



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

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

Filière : Travaux publics
Spécialité : Voie et Ouvrages d'Art

Présenté par :

BELBLIDIA Salima Maroua Loubna

Intitulé du mémoire

***Contribution à l'étude du comportement des poutres métalliques
des ouvrages d'art renforcées par différents types de composite***

Soutenu publiquement le 17/06/2018 Devant le jury composé de :

Mr. Zidour Mohamed	Président
Mr. Tahar Hassaine Daouadji	Rapporteur
Mr. Rabahi Abderezak	Examineur
Mr. Bensattalah Tayeb	Examineur
Mr. Saoula Abdelkader	Examineur

Promotion : 2017 /2018



Remerciement



En préambule à ce mémoire, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté aide et assistance et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette année universitaire.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Tahar HASSAIN DAOUADJI qui, en tant qu'encadreur, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer.

Je voudrais exprimer mes remerciements à Monsieur RABAH Abderezak pour les orientations et les conseils qu'il a su me prodiguer durant l'évolution de ma recherche.

En outre, je tiens à remercier Mr BOUAZGHI Hamid DTP de la wilaya de Tiaret et ces collaborateurs, qui m'ont beaucoup aidé, soutenu et encouragé pour l'élaboration de ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes enseignants qui m'ont tant donné avec beaucoup de compétence tout au long du cursus universitaire, un grand merci ; à Mr BEKKI, Mr DRAICH, Mademoiselle RENNAK, Mr TLIDJI, Mr SAOULA, Mr BENSATALAH, et Mr BENFARHAT pour leurs aides et orientations qui ont enrichi mes connaissances.

Enfin je tiens à remercier toute personne qui a participé de près ou de loin à l'exécution de ce modeste travail.





Dédicace



Je dédie ce travail:

À mes parents, qui ont œuvré pour ma réussite, de part leur amour, leurs soutiens, tous les sacrifices consentis et leurs précieux conseils, pour toute leur assistance et leur présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

À ma grand-mère BAYA, Ce travail est pour moi le fruit de tes prières.

Merci à mes sœurs ; Ratiba, Meriem, Chiraz, Racha, et mon frère Sidahmed, source de soutien et de conseils,

Merci à toute ma famille.

La vie m'a fait un très beau cadeau ; la famille Ouahrani pour Mon oncle Mouhamed et ma tante Fouzia, A Razia, Leila ; Zahra, ALae et Zohir qui a été toujours là pour moi, qui m'a beaucoup aidé et encouragé tout au long de mon cursus universitaire

À ma deuxième famille Bouazghi, pour mon oncle Hamid et ma tante Ratiba et mes cousins, Karim, Lydia et Rayane

À mes amis d'université Ilhem, Sabrina, Fatiha, Slimane, Maram, et Dhakira

Et enfin à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

M.BELBLIDI



Résumé

La technique de renforcement des ouvrages d'art par collage de matériaux composites est utilisée avec succès. Dans cette optique, nous proposons d'apporter une contribution à l'analyse du comportement des poutres métalliques renforcées en flexion par collage de plaque en matériaux composites. Après avoir examiné les limites technologiques des différentes techniques de renforcement, une recherche bibliographique approfondie a été présentée ; qui repose sur l'analyse des méthodes proposées. Dans ce contexte, une analyse portant sur l'évaluation du gain en résistance des poutres en acier renforcées par matériaux composites ainsi que les paramètres influençant le comportement en rigidité. L'ensemble des résultats a mis clairement en évidence l'influence du composite en particulier sur la capacité portante des poutres qui peut être augmentée et peut contribuer au renforcement rapide et efficace des structures, comme elle peut aussi rendre aux éléments porteurs leur résistance, leur rigidité et leur portance.

Cependant, le mode de rupture le plus important de ces poutres renforcées est le décollement de la plaque composite en raison des contraintes d'interface élevées à la proximité du bord de la plaque de renforcement collée (Effets de bord). Des prédictions exactes de telles contraintes sont donc nécessaires pour prévoir ce mode de ruine. La présente étude propose une méthode analytique permettant d'analyser les contraintes d'interface au niveau de la couche d'adhésif d'une poutre en acier, la nature des matériaux composites a été prise en compte dans l'analyse théorique en supposant une répartition linéaire des contraintes à travers l'épaisseur de l'adhésif. Les résultats de cette méthode coïncident parfaitement avec ceux issus de la littérature.

Mots-clés : matériaux composites, poutre métallique, collage, renforcement, décollement, contraintes d'interface,

Abstract

The technique of strengthening works of art by collating composite materials is used successfully. In this context, we propose to contribute to the analysis of the behavior of reinforced steel beams with plate collage in composite materials. After examining the technological limitations of the various strengthening techniques, a thorough bibliographic search was presented; based on the analysis of the proposed methods. In this context, an analysis of the assessment of the strength gain of reinforced steel beams and the parameters influencing stiffness behavior. The overall results have clearly demonstrated the influence of the particular composite on the bearing capacity of the beams that can be increased and can contribute to the rapid and efficient reinforcement of structures, as it can also render the carriers their resistance, rigidity and lift.

However, the most important mode of rupture of these reinforced beams is the removal of the composite plate due to high interfacial shear and normal stresses at the close of the glued reinforcement plate (Edge Effects). Accurate predictions of such constraints are there for en necessary to predict this mode of ruin. The present study propose analytical method to analyze interface constraints at the adhesive laver level of a steel beam. The nature of composite materials has been taken into account in the theoretical analysis assuming a linear distribution of constraints through the thickness of the adhesive. The results of this method coincide perfectly with those derived from literature.

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

ملخص:

استخدام تقنية تعزيز المنشآت الفنية عن طريق إصاق المواد المركبة أثمرت بالنجاح. وفي هذا السياق نقترح القيام بتحليل سلوك الروافد المعدنية المعززة بصفائح المواد المركبة. بعد اختبار الحدود التكنولوجية لمختلف تقنيات التعزيز، بحوث بليوغرافية متعمقة التي قدمت والتي تستند على تحليل المنهجيات المقترحة. وفي هذا السياق، تم التحليل لتقييم كسب القوة من الروافد المعدنية المعززة بالمواد المركبة بالإضافة إلى العوامل المؤثرة على الصلابة والصمود. مجموع النتائج المتحصل عليها أثبتت بشكل واضح تأثير المواد المركبة على القدرة الاستيعابية للروافد والتي تستطيع زيادة التعزيز السريع والفعال للهياكل، كما أنها تستطيع إعادة القوة والصلابة والصمود للعناصر الحاملة. ومع ذلك انفصال اللوحة المركبة للدعامة نتيجة التركيز العالي للإجهادات على حواف هذه الأخيرة هو الانتقاع الأكثر شيوعاً لهذه الروافد المعززة (تأثير الحواف)، ولذلك فإن التنبؤ الدقيق بهذه الإجهادات ضرورة لا بد منها لمعرفة هذا النوع من الانتقاع هذه الدراسة تقترح أسلوباً تحليلياً يسمح بتحليل الإجهادات السطحية على مستوى طبقة المادة اللاصقة والروافد المعدنية وقد أخذت بعين الاعتبار طبيعة المواد المركبة وفرضية التوزيع الخطي للإجهادات من خلال سمك المادة اللاصقة في هذا التحليل النظري. وقد تطابقت هذه النتائج تماماً مع النتائج المستخلصة نظرياً.

الكلمات المفتاحية: المواد المركبة، الرافدة المعدنية، إصاق، إنفصال، الإجهادات السطحية

Résumé	III
Abstract.....	IV
Liste des figures.....	IX
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Pathologies, renforcement et mode de rupture des structures métalliques	
I.1. Introduction :	3
I.2. Pathologies et principales causes des désordres affectant les ouvrages.....	3
I.2.1. Dégradation des matériaux.....	3
I.2.2. Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution.....	6
I.2.3. Modification des conditions d'exploitation des ouvrages.....	6
I.3. Méthodes et techniques de renforcement.....	6
I.3.1. Méthodes de réparation non structurales.....	7
I.3.2. Méthodes de réparation structurales.....	7
I.4.1. renforcement des ouvrages en béton armé.....	8
I.4.2. Les différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I.....	9
I.5. Modes de rupture des poutres métalliques renforcées par matériaux composites	10
I.5.1. La rupture due à la traction de la poutre métallique ou du FRP.....	10
I.5.2. Rupture due à la compression de la poutre métallique.....	11
I.5.3. Rupture due au décollement.....	12
I.5.4. Rupture due au cisaillement.....	12
I.6. Conclusion.....	13
Chapitre II : Généralités sur les matériaux composites	
II.1. Introduction.....	14
II.2. Définition d'un matériau composite	14
II.3. Composition des matériaux composites.....	15
II.3.1. Les renforts :	15

II.3.2. Les matrices	19
II.4. Les charges et additifs.....	21
II.5. Les adhésifs.....	21
II.6. Avantages et inconvénients des composites	22
II.7. Domaines d'application des composites.....	22
II.7.1. Les composites et la construction électrique	22
II.7.2. Les composites dans l'aéronautique	22
II.7.3. Les composites dans le ferroviaire.....	23
II.7.4. Les composites dans la construction civile	23
II.8. Conclusion	23
 Chapitre III : Analyse et modélisation des poutres renforcées par collage externe de différents types de composite	
III.1. Introduction	24
III. 2. Hypothèses de la présente méthode.....	24
III. 3. Analyse	25
Un élément dx de la poutre renforcée (figure III.1) est représenté dans la (figure III.2).	25
III. 3.1 Les déformations	25
III. 3.2 La distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite-Acier	27
III. 3.3 Application des conditions aux limites.....	29
III. 3.4 La distribution des contraintes normales dans l'interface composite – Acier.....	32
III. 4. Vérification de la méthode	33
III. 4. 1. Comparaison analytique de la présente méthode avec des résultats issus de la littérature	34
III. 4. 2. Efficacité du renforcement des poutres métallique : <i>Comparaison analytique expérimentale</i>	35
III.5. Conclusion :	44

Chapitre IV : Etude paramétrique

IV.1.Introduction	45
IV.2.Effet de la longueur non renforcée « a »	45
IV.3.Effet du module de Young « Ea»	49
IV.4.Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésif (t_a)	52
IV.5.Effet de l'épaisseur du composite « t_2 »	55
IV.6. Effet de la fraction volumique des fibres « ν_f »	58
IV.7.Conclusion.....	61
Conclusion générale	62
Références bibliographiques.....	64

Liste des figures

Chapitre I : Pathologies, renforcement et modes de rupture des structures métalliques

Figure I. 1: Corrosion d'un pont métallique..... 4
Figure I. 2 : Structure atteinte par l'attaque des chlorures..... 4
Figure I. 3 : Poutre corrodé au bord de la mer 5
Figure I. 4 : Renforcement par précontrainte additionnelles 8
Figure I. 5: Renforcement par plats métalliques 8
Figure I. 6 : Tablier de pont renforcer par matériaux composites 9
Figure I. 7: Rupture en tension de la poutre en I..... 11
Figure I. 8: Rupture en tension de la plaque composite 11
Figure I. 9: Instabilité locale de la poutre en I..... 12
Figure I. 10 : Décollement de la plaque. 12
Figure I. 11: Rupture en cisaillement. 12

Chapitre II : Généralités sur les matériaux composites

Figure II. 1: Description d'un matériau composite 14
Figure II. 2 : organigramme des principaux matériaux des renforts 15
Figure II. 3: Exemple des fibres de carbone 16
Figure II. 4: Fibres d'aramide..... 17
Figure II. 5 : Fibres de verre 18
Figure II. 6: Fibres de bore 19
Figure II. 7: organigramme des principaux matériaux des matrices 19
*Figure II. 8: Exemples des charges : (a) microbilles de verre, (b) noir de carbone, (c) silice.
..... 21*

Chapitre III : Analyse et modélisation des poutres renforcées par collage externe de différents types de composite

Figure III. 1: Poutre métallique en I simplement appuyée renforcée par une plaque composite 25
Figure III. 2 : Un segment différentiel de la poutre métallique renforcée par collage de composite 25
Figure III. 3: IPE renforcé par composite sous chargement uniformément répartie 30
Figure III. 4 : IPE renforcé par composite sous une charge concentrée P 31
Figure III. 5 : IPE renforcé par composite sous deux charges concentrées symétriques..... 31
Figure III. 6: Comparaison des résultats analytique-expérimentale 36

<i>Figure III. 7: Validation de la Présente Méthode par comparaison avec la littérature.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure III. 8 : Validation de la Présente Méthode par comparaison avec la littérature.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure III. 9: Validation de la Présente Méthode par comparaison avec la littérature avec l'ajout de précontrainte.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure III. 10 : Validation de la Présente Méthode par comparaison avec la littérature.....</i>	<i>44</i>

Chapitre IV : Etude paramétrique

<i>Figure IV. 1 : Influence de la longueur non renforcé sur les contraintes de cisaillement d'un IPE renforcé par Cabodur</i>	<i>46</i>
<i>Figure IV. 2 : Influence de la longueur non renforcé sur les contraintes de cisaillement d'un IPE renforcé par TFC</i>	<i>48</i>
<i>Figure IV. 3 : Influence du module d'élasticité de l'adhésif sur les contraintes de cisaillement d'un IPE renforcé par Cabodur</i>	<i>50</i>
<i>Figure IV. 4 : Influence du module d'élasticité de l'adhésif sur les contraintes de cisaillement d'un IPE renforcé par TFC.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure IV. 5 : Influence de l'épaisseur de la couche d'adhésif sur les contraintes de cisaillement d'un IPE renforcé par Carbodur</i>	<i>53</i>
<i>Figure IV. 6 : Influence de l'épaisseur de la couche d'adhésif sur les contraintes de cisaillement d'un IPE renforcé par TFC.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure IV. 7: Influence de l'épaisseur du composite sur les contraintes de cisaillement d'un IPE renforcé par Carbodur.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure IV. 8 : Influence de l'épaisseur du composite sur les contraintes de cisaillement d'un IPE renforcé par TFC</i>	<i>57</i>
<i>Figure IV. 9 : Influence de la fraction des fibres sur les contraintes de cisaillement d'un IPE renforcé par Carbodur</i>	<i>59</i>
<i>Figure IV. 10 : Influence de la fraction des fibres sur les contraintes normale d'un IPE renforcé par TFC</i>	<i>60</i>

Liste des tableaux

Chapitre I :Pathologies, renforcement et mode de rupture des structures métalliques

Tableau I.1: Différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I..... 10

Chapitre II :Généralités sur les matériaux composites

Tableau II. 1: Propriétés des fibres de carbone..... 16

Tableau II. 2: Propriétés des fibres de Kevlar. 17

Tableau II. 3 : Propriétés des fibres de Verre. 18

Tableau II. 4: Propriétés des Résines thermodurcissables. 20

Chapitre III : Analyse et modélisation des poutres renforcées par composites

Tableau III. 1: Propriétés géométriques et mécaniques des matériaux..... 34

Tableau III. 2: Autres paramètres..... 34

Tableau III. 3 : Tableau comparatif des contraintes maximales (en MPa)..... 35

Tableau III. 4: Comparaison des contraintes d'interface (en MPa) pour $P_0=20kN$ sous différents chargements 37

Tableau III. 5: Comparaison des contraintes d'interface (en MPa) pour $P_0=40kN$ sous différents chargements 38

Abréviations :

FRP: Fiber-Reinforced Polymer .

HR : Haute Résistance.

HM : Haut Module.

IM: Module Intermédiaire.

CFRP: Carbon Fiber-Reinforced Polymer.

TD :Thermodurcissable

TP : Thermoplastique

Notation :

R_t : La résistance à la rupture des fibres.

E_{oT} : Le module d'Young.

A_R : L'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 : Épaisseur de l'âme du profilé en I.

t_0 : Épaisseur 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 respectivement.

$\varepsilon_1(x)$ et $\varepsilon_2(x)$: déformations de la poutre métallique et de la plaque composite respectivement.

$u_1(x)$ et $u_2(x)$: les déplacements longitudinaux a la face inferieure de l'acier 1 et la face supérieure de la plaque composite respectivement.

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.

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

$\sigma_n(x)$: Contrainte normale.

$M_1(x)$ Et $M_2(x)$: les moments d'inertie et les moments fléchissant de la poutre en acier et la plaque composite.

E_1 , E_2 et E_a : les modules d'élasticité longitudinaux de l'acier, de la plaque composite et de l'adhésif respectivement.

I_1 Et I_2 : moment d'inertie de la poutre métallique et du composite respectivement.

A_1 Et A_2 : section transversale de la poutre métallique et du composite respectivement.

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

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

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

$\tau_a(x)$: Contrainte de cisaillement au niveau de la couche adhésive.

ξ : Coefficient qui tient compte de la forme géométrique de la section étudiée.

K_s : La rigidité au cisaillement de la couche d'adhésif.

G_a : Module du cisaillement.

t_a : L'épaisseur de la couche adhésive.

R : Coefficient de proportionnalité.

M_T : Moment de la poutre hybride.

G_1 Et G_2 : module de cisaillement de la poutre métallique et de la plaque composite.

ν_1 : Coefficient de poisson de l'acier.

ν_a : Coefficient de poisson de l'adhésif.

B_1 Et B_2 : constante d'intégration.

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

$w_1(x)$ Et $w_2(x)$: déplacement verticale de la poutre métallique et de la plaque composite.

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 : 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.

k_{xy} : est la courbure de torsion du stratifié.

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.

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

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.

$[A_{ij}], [B_{ij}]$ Et $[D_{ij}]$: sont respectivement la matrice de membrane, la matrice de couplage membrane-flexion et la matrice de flexion.

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 $[A_{ij}]$.

P_0 : Force de précontrainte.

Introduction générale

Un ouvrage de génie civil est dimensionné pour une durée de vie de cent ans en moyenne. Toutefois, plusieurs types de désordres viennent réduire cette durée de vie prévisionnelle et aujourd'hui, un ouvrage sur trois nécessite une maintenance pour assurer la sécurité des usagers. De nombreuses réparations et pathologies structurelles issues des erreurs de conception lors du dimensionnement ou lors de l'exécution, des défauts de résistance à l'effort tranchant ou en flexion dus au chargement excessif, ainsi que celle liée à la fatigue de la structure sous divers chargements sont à l'origine de la diminution de la durée de vie théorique d'une structure. Par ailleurs, la dégradation des matériaux et des structures, comme la corrosion des aciers, est souvent la raison principale d'une insuffisance de capacité structurale ainsi que les phénomènes sismiques ont fortement endommagé sinon détruits de nombreux bâtiments conçus selon les anciens codes. A la lumière de ces résultats, des nouvelles orientations concernant les techniques de construction nous ont incitées à la réflexion de nouvelles méthodes de réhabilitation afin de parer à ce phénomène naturel.

La maintenance des ouvrages d'art consiste à les protéger en assurant une meilleure étanchéité ou en limitant la corrosion, à les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance, à les renforcer en améliorant les performances et la durabilité des ouvrages. C'est un problème de plus en plus préoccupant dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est de plus en plus élevé et les conditions de réparation de plus en plus difficiles. A l'heure actuelle, les besoins en matière de maintenance, de réparation et de réhabilitation des ouvrages sont donc très importants que leur dimensionnement ou leur réalisation. Face à ce problème, le renforcement par collage de matériaux composites s'avère être une technique prometteuse. De nos jours, la technique de renforcement par collage externe de composite à fibres de carbone est l'une des méthodes de réhabilitations les plus utilisées ; et peut contribuer à la réparation rapide et efficace des structures, comme elle peut aussi rendre aux éléments porteurs leur résistance, leur rigidité et leur portance.

Si cette méthode est relativement simple d'un point de vue technologique, le comportement de l'ouvrage renforcé est moins évident à cerner.

- D'une part, on est en présence d'une structure multicouche (acier, colle, composite) si le comportement du premier de ces trois matériaux est bien connu, son association par

collage avec le composite est plus délicate à appréhender dans la mesure où ce mode de liaison n'est pas classique en acier, ceci revient à se demander si la théorie des poutres peut toujours être considérée comme valable.

- D'autre part, les structures sur lesquelles sont appliqués les composites ont un passé, si elles sont toujours en service ; elles peuvent présenter une dégradation reconnaissable, où leur prise en compte avant l'application du matériau de réparation s'avère nécessaire.

La présente mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une recherche sur les différentes types de dégradations des ouvrages en béton armé en les classant en fonction de leur origine chimique, physique ou mécaniques ainsi que les différentes technologies de réparation non structurales et structurales des ouvrages. Une des techniques de réhabilitations les plus utilisées ; le renforcement par collage à l'aide de plaques métalliques, comme cette technique présente quelques désavantages liés à l'acier, l'utilisation des matériaux composites à fibre de carbone peut contribuer à la réparation rapide et efficace des structures.

Le deuxième chapitre est une recherche bibliographique sur les matériaux composites à base de fibres de carbone, leurs mises en œuvre, leurs principales propriétés et leurs utilisations dans le domaine de génie civil.

Le troisième chapitre est consacré à un développement mathématique d'un modèle pour le calcul des contraintes d'interface acier-composite ; pour le cas des poutres en métalliques renforcées en flexion par collage de plaque en matériaux composite. La validation du modèle a été effectuée par comparaison avec ceux issus de la littérature ainsi qu'une confrontation expérimentale - analytique a été présentée.

Le quatrième chapitre, on s'intéresse à l'étude de l'effet des différents paramètres sur la distribution des contraintes d'interface dans une poutre en acier renforcée par des plaques en matériaux composites.

Chacun de ces chapitres est terminé par une conclusion partielle, dont le bilan est effectué en conclusion générale, et qui permet d'envisager des perspectives aux travaux présentés ici.

I.1. Introduction :

Depuis plusieurs années, la réfection et le renforcement des ouvrages métalliques prennent plus d'importance dans la construction. Plusieurs facteurs font qu'il peut être nécessaire de renforcer ou de réparer un ouvrage : la corrosion, des changements d'affectation qui imposent des nouvelles charges, un mauvais dimensionnement, l'évolution de normes, des accidents (choc contre un élément de structure), l'endommagement par un tremblement de terre, la prolongation de la durée de vie d'un ouvrage, etc. Il est donc nécessaire de protéger les structures, de les réparer et parfois les renforcer.

Réparer une construction est une opération qui consiste à lui restituer, par des travaux appropriés, un niveau de service perdu. par contre la renforcer, consiste à augmenter son niveau de service et en particulier, l'augmentation de sa ductilité et de sa résistance pour permettre son utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre des sollicitation non prises en compte dans les calculs (un séisme par exemple)

En général, la réparation ou renforcement a pour but d'améliorer les performances et la durabilité de l'ouvrage et permet de compenser les pertes de rigidités ou de résistances

L'étude pathologique de la vulnérabilité et du comportement mécanique des structures métalliques endommagées a conduit vers l'utilisation des matériaux composites comme renfort assurant un retour de rigidité et de résistance.

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

I.2.1. Dégradation des matériaux

Les propriétés physiques sont particulièrement, le comportement mécanique du béton et des aciers sont susceptibles de se dégrader en fonction des conditions d'environnement définies par la localisation géographique de l'ouvrage. Les principales causes de vieillissement sont liées aux phénomènes suivants(Hamelin, 2002).

- Erosion, abrasion, chocs

Les ouvrages sujets à l'érosion se situent essentiellement en milieu fluvial et maritime. Ils sont soumis au charriage d'éléments solides induits par les courants, à l'action des vagues à chaque marée. La dégradation du béton par frottement se traduit par la création de défauts géométriques de surface, l'apparition d'épaufrure et par des éclatements superficiels qui entraînent la mise à nu des armatures et l'accélération des risques de corrosion [NET 01].



Figure I. 1: Corrosion d'un pont métallique

- **Action des cycles de gel-dégel**

L'altération des ouvrages en béton armé construits en montagne ou dans des régions en saison hivernale rigoureuse est due essentiellement aux cycles gel-dégel (qui provoque des gonflements et une fissuration), et à l'utilisation de sels de déverglaçage (anti-verglas). Les symptômes des courants sont l'écaillage présent à la surface de la structure, et un gonflement accompagné d'une fissuration en réseau (Ferrier, 1999).

- **Altération physico-chimique**

L'eau et l'hygrométrie des conditions ambiantes sont à l'origine de différents mécanismes de dégradation du béton. L'eau, lors de sa percolation au sein du béton, dissout des constituants tels que la chaux et augmente la porosité du béton. 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 carbonation du béton. Une autre cause de vieillissement du béton correspond aux mécanismes d'alcali - réaction entre les granulats et le ciment. La formation de gels expansifs qui en résulte se traduit par un gonflement du béton et par le développement de fissures.

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



Figure I. 2: Structure atteinte par l'attaque des chlorures

- Corrosion des armatures métalliques

La durée de vie des structures en béton armé est conditionnée par la réponse aux agressions physiques et chimiques de l'environnement, ainsi que par la capacité des matériaux constitutifs à se protéger contre ces attaques. La corrosion des armatures en acier est une des causes majeures de dégradation des structures.



Figure I. 3: Poutre corrodé au bord de la mer

- La fatigue

D'une manière générale, les structures soumises à des charges variables répétées peuvent subir un endommagement qui se manifeste par la propagation de fissures. Cet endommagement est appelé fatigue et se traduit par une perte de résistance au cours du temps.

De nombreuses recherches ont été effectuées dans le domaine de la fatigue. 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 contrainte ou de contraintes résiduelles) (Breumen, 1989).

Les conséquences de la corrosion sur la structure sont non négligeables et se reflètent de différentes façons dépendantes ou non. Une des premières conséquences est la réduction de section de l'armature corrodée, qui aura des répercussions sur d'autres paramètres. En effet, celle-ci va s'accompagner d'une expansion volumique globale de l'armature, car l'acier corrodé va se transformer en rouille qui va s'hydrater et occuper un volume qui sera environ deux ou trois fois le volume de l'acier sain.

I.2.2. Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution

Ce type de désordres peut être induit par des erreurs intervenant soit au stade du dimensionnement de l'ouvrage, soit au stade de son exécution. L'objectif réside dans la recherche des remèdes pour ces signes de fatigue.

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

Les erreurs d'exécution qui sont susceptibles de justifier une intervention au niveau de l'ouvrage portent sur 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 sur les conditions non satisfaisantes de décoffrage, de transport et de manutention.

I.2.3. Modification des conditions d'exploitation des ouvrages

La pathologie des structures en génie civil dépend de plusieurs facteurs : le type de la structure, les matériaux utilisés, et la nature du sol des fondations, dans certains cas, on prend en considération des sollicitations extrêmes (climatiques ou accidentelles). Ce dernier influé par l'évolution du trafic, ou de la voirie, il est possible de justifier la nécessité de renforcer ou d'améliorer la portance d'un ouvrage.

L'évolution des conditions de chargement est souvent induite soit par la modification des charges réglementaires sur essieux, soit par une modification de la fréquence des sollicitations qui s'exercent ou une sous-évaluation des charges d'exploitation (Calgaro, 1997).

I.3. Méthodes et techniques de renforcement

Il est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, le choix de la méthode de réparation et des matériaux à mettre en œuvre, en tenant compte des critères économiques des matériaux de construction, des conditions de chantier et des contraintes de site. Le principe de renforcement ou de réparation consiste en adjonction de matière dans les zones où les sections sont trop sollicitées. Une section devient trop sollicitée si, du fait même des dispositions adoptées ou du changement des conditions d'exploitations, les efforts appliqués sont supérieurs à ceux pris en compte dans les calculs (problème de renforcement), ou bien si la résistance a diminué par suite de dégradation (problème de la réparation) (Llanoos, 1997).

I.3.1. Méthodes de réparation non structurales

Des solutions de réparation graduelles peuvent être envisagées. Lorsque les désordres sont peu importants, des méthodes non structurales sont utilisées. Ces techniques de réparation dites « légères » consistent en une reprise du béton dégradé par ragréage ou injection.

Le traitement du béton peut faire l'objet d'opération de ragréage par application de couches de peinture ou de mortier hydraulique ou polymérique après traitement de la poutre dégradée.

La réparation par injection des 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 structurales

Les réparations et/ou renforcements structuraux des ouvrages en béton armé peuvent être effectués soit par ajout de forces, soit par ajout de matière. Parmi les méthodes de réparation structurales on distingue (Godart, 1997) :

1. Réparation par adjonction d'armature complémentaire

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupés accidentellement. Cette solution peut également être envisagée lorsqu'il s'agit de renforcer une structure (Yahiaoui, 2006).

2. Renforcement des structures par précontraintes additionnelles

Réparer ou renforcer des structures fissurées ou disloquées par des pièces métalliques rapportées passives (cerceaux, boulons, tirants) est un procédé très ancien. Il est donc normal que la précontrainte, qui présente certains points communs avec ce principe, ait trouvé, dès ses débuts, un développement rapide et remarquable dans le domaine de la réparation des ouvrages. Elle permet, en effet, d'appliquer des efforts d'une intensité connue, en des points et suivant des directions bien définies, capable de s'opposer aux efforts générateurs des désordres. Elle est qualifiée d'additionnelle lorsqu'on l'applique à des ouvrages existants pour augmenter leur capacité portante ou prolonger leur durée d'exploitation (Fargeot1997).



Figure I. 4: Renforcement par précontrainte additionnelles

3. Renforcement par collage de plats métalliques

Ce procédé est un apport d'armatures extérieures soit pour consolider un élément dont les dégradations mettent en péril la résistance, soit pour remplacer des aciers oubliés, ou mal positionnés. La préparation des surfaces, la mise en œuvre des colles et la réalisation du placage, doivent impérativement être confinées à des entreprises spécialisées (NET 02).



Figure I. 5: Renforcement par plats métalliques

4. Renforcement par collage de plats composites

Les premières études sur le comportement mécanique d'une structure en charpente métallique, renforcée par collage de matériau composite sont réalisées dans le laboratoire fédéral Suisse par Meier et Kaiser [MEI-92]. L'augmentation de la capacité portante, par rapport à une poutre non renforcée de référence était de 200%. La constatation a été faite que la propagation des fissures de cisaillement peut entraîner le décollement prématuré du renforcement extérieur en matériau composite (Zhelyazov, 2008).

I.4.1. renforcement des ouvrages en béton armé

La majorité des dommages des structures en béton sont causés par des déficiences au niveau de détails de construction des éléments structuraux ; bien que les causes qui conduisent à un renfort structurel soient aussi nombreuses que le nombre de structures elles-mêmes.

Citons par exemple : l'accroissement des charges qui sollicitent la structure, la rénovation des structures anciennes, le changement de la forme de la structure, les dégâts dans la structure, la nécessité d'améliorer les conditions en service. Les travaux de réhabilitation ou de réparation des colonnes ont conduit à la recherche de nouvelles méthodes de renforcement à partir de méthodes connues, telles que l'installation des chemises en acier (*steel jacket*) autour des colonnes en béton. L'intérêt pour des matériaux composites collés offre des avantages évidents. Entre autres, ils permettent une facilité d'installation et une durabilité accrue comparativement à l'enveloppe d'acier conventionnelle (Badour, 2018).

I.4.2. Les différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I

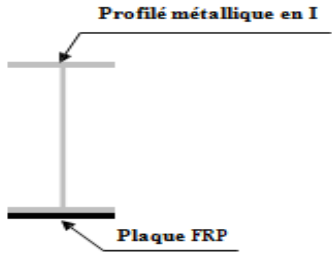
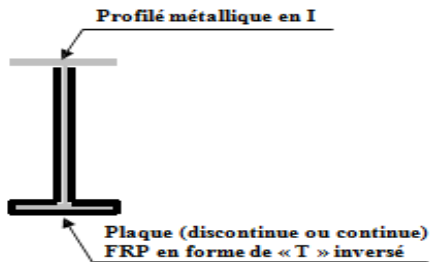
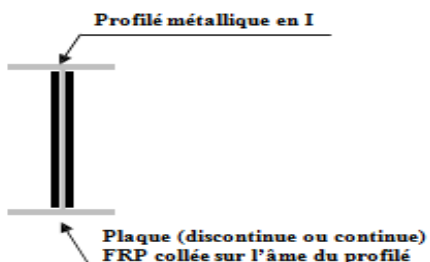
En génie civil, les matériaux composites utilisés sont essentiellement des composites carbone - époxyde ou verre - époxyde. Leurs performances mécaniques spécifiques sont en effet supérieures à celles de l'acier, principalement la résistance à la traction et en compression



Figure I. 6: Tablier de pont renforcé par matériaux composites

En génie civil, les matériaux composites utilisés sont essentiellement des composites carbone - époxyde ou verre - époxyde. Leurs performances mécaniques spécifiques sont en effet supérieures à celles de l'acier, principalement la résistance à la traction et en compression (Mufti, 1991). Le tableau (I.1) représente les différents schémas de collage de matériaux composites sur une poutre métallique en I travaillant en flexion, chaque schéma est prévu pour un objectif particulier (en flexion et/ou en cisaillement) (NET 03) (Belblidia, 2018).

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

Schémas de renforcement	Objectif du schéma de renforcement
 <p>Le schéma illustre une poutre métallique en I. Une plaque FRP est collée sur la face inférieure de la poutre. Des étiquettes indiquent 'Profilé métallique en I' et 'Plaque FRP'.</p>	<p>en flexion</p>
 <p>Le schéma illustre une poutre métallique en I. Une plaque FRP en forme de « T » inversé est collée sur la face inférieure de la poutre. Des étiquettes indiquent 'Profilé métallique en I' et 'Plaque (discontinue ou continue) FRP en forme de « T » inversé'.</p>	<p>en flexion et cisaillement</p>
 <p>Le schéma illustre une poutre métallique en I. Une plaque FRP est collée sur l'âme de la poutre. Des étiquettes indiquent 'Profilé métallique en I' et 'Plaque (discontinue ou continue) FRP collée sur l'âme du profilé'.</p>	<p>en cisaillement</p>

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

La combinaison des matériaux composites comme renforcement de poutres métalliques produit de nouveaux modes de rupture, ces ruptures peuvent se situer à différents niveaux dans la poutre métallique, dans le composite ou dans l'interface acier composite. Les principaux modes de rupture susceptibles d'être observés dans les poutres métalliques renforcées extérieurement par des plaques en matériaux composites et travaillant en flexion, sont décrits ci-après (CNR-DT202, 2007).

I.5.1. La rupture due à la traction de la poutre métallique ou du FRP

Quelques éléments métalliques anciens sont réalisés en fer de fonte, qui est un matériau présentant une rupture fragile en traction. Dans ce cas, la conception est habituellement destinée à réduire les contraintes normales produites par les charges permanentes et les surcharges, afin d'augmenter la sécurité contre la rupture sur la face tendue de l'élément métallique.

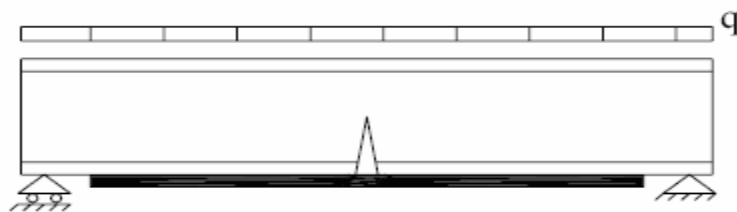


Figure I. 7: Rupture en tension de la poutre en I

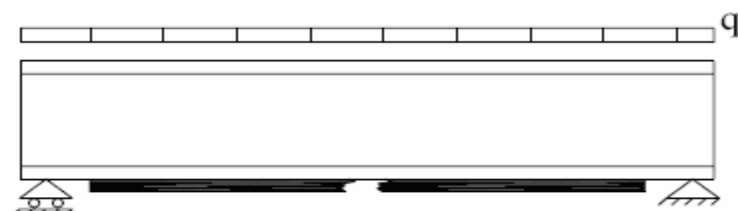


Figure I. 8: Rupture en tension de la plaque composite

Concernant les poutres en fer de fonte, l'utilisation de FRP pré-tendu 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. En 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 des 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 par matériau composite. 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.7) et (I.8).

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

La 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, tels que le fer de fonte sont caractérisés par le non linéarité en traction, avec une réduction progressive de la rigidité, contrairement au fer puddlé et l'acier. Dans le cas des poutres en acier, les codes modernes de conception, tels que l'Eurocode 3 donne des règles pour établir le type du mode de rupture due à la compression. Dans le cas de la fonte ou du fer puddlé, une recherche spécifique est recommandée pour établir le type de mode de rupture due à la compression. (instabilité locale) cette dernière est représentée par la figure (I.9) (Eurocode 3, 1993).

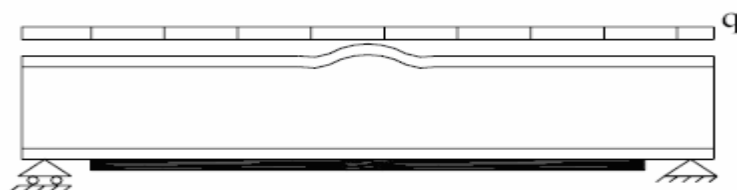


Figure I. 9: Instabilité locale de la poutre en I

I.5.3. Rupture due au décollement

L'analyse de la section composite (poutre métallique et FRP) est habituellement effectuée dans l'hypothèse d'un collage parfait entre la poutre métallique et FRP. Mais, ce n'est pas toujours le cas, car l'adhésif est réalisé d'une couche mince et déformable. La concentration de forte contrainte et déformation se produit normalement à l'interface entre la poutre métallique et le FRP où les discontinuités se produisent, comme à l'extrémité de la plaque FRP. Cette concentration de contrainte est à l'origine de la rupture due au décollement. La rupture par délaminage ou décollement à l'interface entre la poutre métallique et la plaque composite au niveau des extrémités est représentée par la figure (I.10).

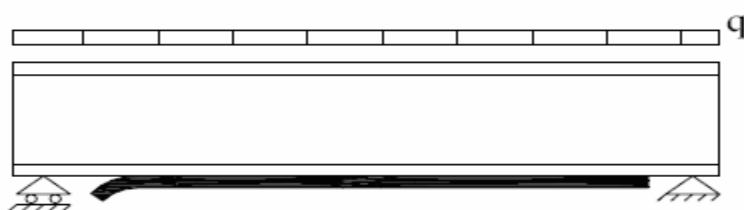


Figure I. 10 : Décollement de la plaque.

I.5.4. Rupture due au cisaillement

Puisque le renforcement en flexion implique 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.11).

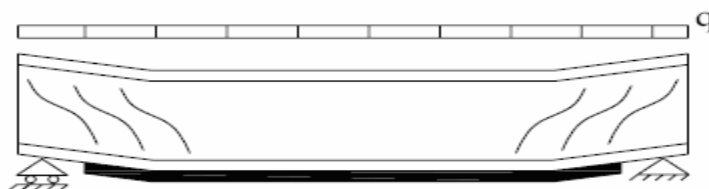


Figure I. 11: Rupture en cisaillement.

I.6. Conclusion

Cette recherche sur les pathologies et les techniques de réparation des structure de génie civil, nous a permis de conclure que :

Le renforcement des structures métalliques par ajout d'armatures externes est une technique couramment utilisée depuis la fin des années 60. En effet, il est dans la plupart des cas rentable de réparer que de reconstruire.

Avec l'essor que connaissent les matériaux composites, suite à leurs performances mécaniques ,en plus des techniques de renforcement et de réparation des structures de génie civil en utilisant ces matériaux sont développées et proposées.

En conséquence, ce chapitre, nous a conduits d'une part à nous intéresser en premier lieu, aux matériaux composites utilisés comme technique de renforcement qui sera largement développés dans le chapitre qui suit, en second lieu, de proposer une technique de renforcement et de réparation par matériau composite.

II.1. Introduction

La conception d'une structure est inévitablement liée à la nature de ses matériaux. De ce fait la technologie moderne exige des matériaux qu'ils soient à la fois résistants, rigides, légers et surtout adaptables à des utilisations spécifiques. Rares sont les matériaux qui répondent d'une façon intégrale à ces exigences. Les matériaux traditionnels limitent les champs d'actions par leurs propriétés mécaniques et leurs techniques de mise en œuvre.

La naissance de produits nouveaux tels que les matériaux composites ouvre un large éventail d'application, et répond à des utilisations bien spécifiques.

II.2. Définition d'un matériau composite

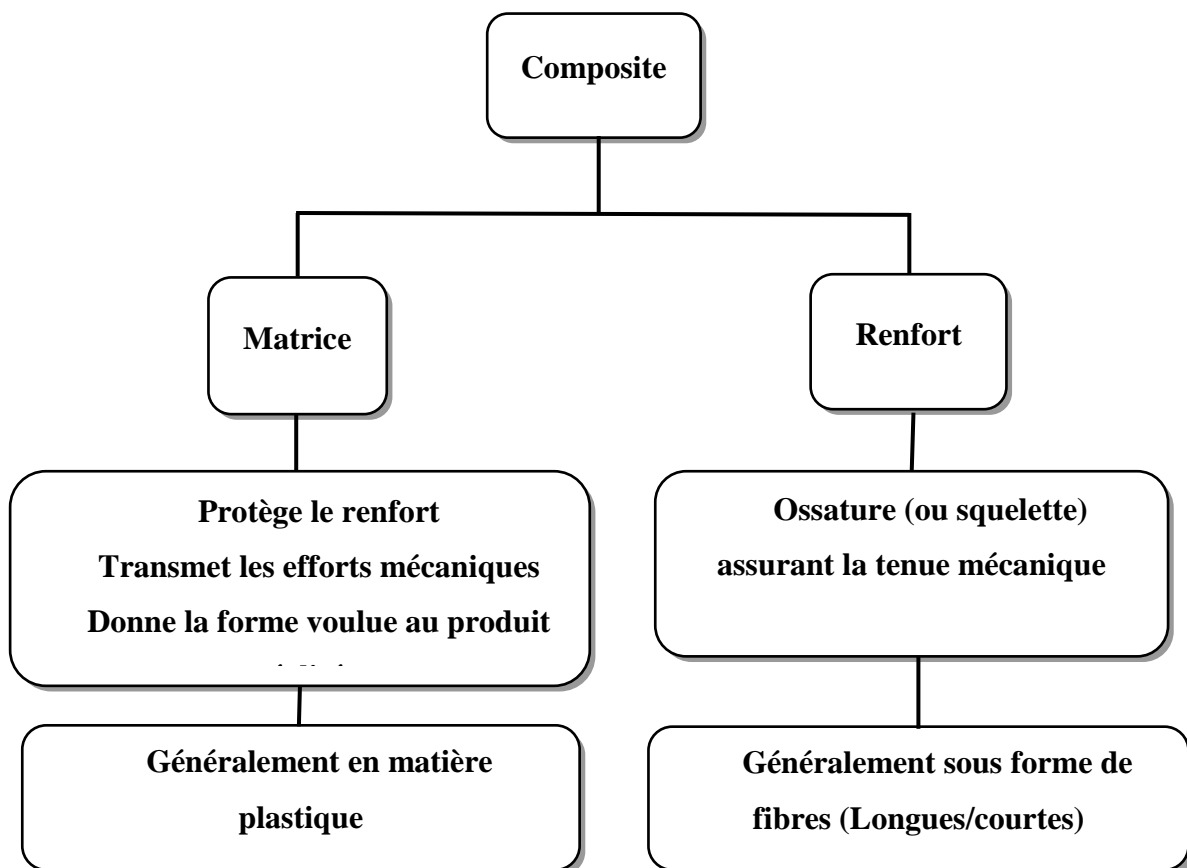


Figure II. 1: Description d'un matériau composite

Un matériau composite est l'alliage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes, non miscibles, qui permet l'obtention d'un matériau hétérogène. Il est généralement constitué de deux phases, une phase continue appelée renfort qui se présente sous forme de fibres (organiques ou inorganiques), assure la tenue mécanique et d'une phase discontinue comme

protection appelée matrice qui assure la cohésion de la structure et le transfert des charges entre les renforts (Adim,2016).

II.3.Composition des matériaux composites

II.3.1.Les renforts :

Le renfort est tout simplement le squelette ou l'armature du composite ;il confère aux composite leurs caractéristiques mécaniques :rigidité ,résistance à la rupture ,durée.il permet aussi d'améliorer certaines propriétés physiques :comportement thermique ,tenue en haute températures ,tenu au feu ,résistance l'abrasion ,et propriétés électriques .

Les caractéristiques recherchées pour le renfort sont : les caractéristiques mécaniques élevées, masse volumique faible, bonne compatibilité avec les matrices, facilité de mise en œuvre, faible coût.

Le renfort est sous forme lamellaire, granulaire ou fibreuse. Ces derniers se présentent suivant trois modes de mise en œuvre.

- Les fils : unidirectionnel : toutes les fibres sont orientées suivant une même direction.
- Les tissus : bidirectionnels : les fibres sont placées selon deux directions perpendiculaires
- Les mats : multidirectionnels : les fibres sont dans tous les sens
- Les principaux matériaux de renfort sont :

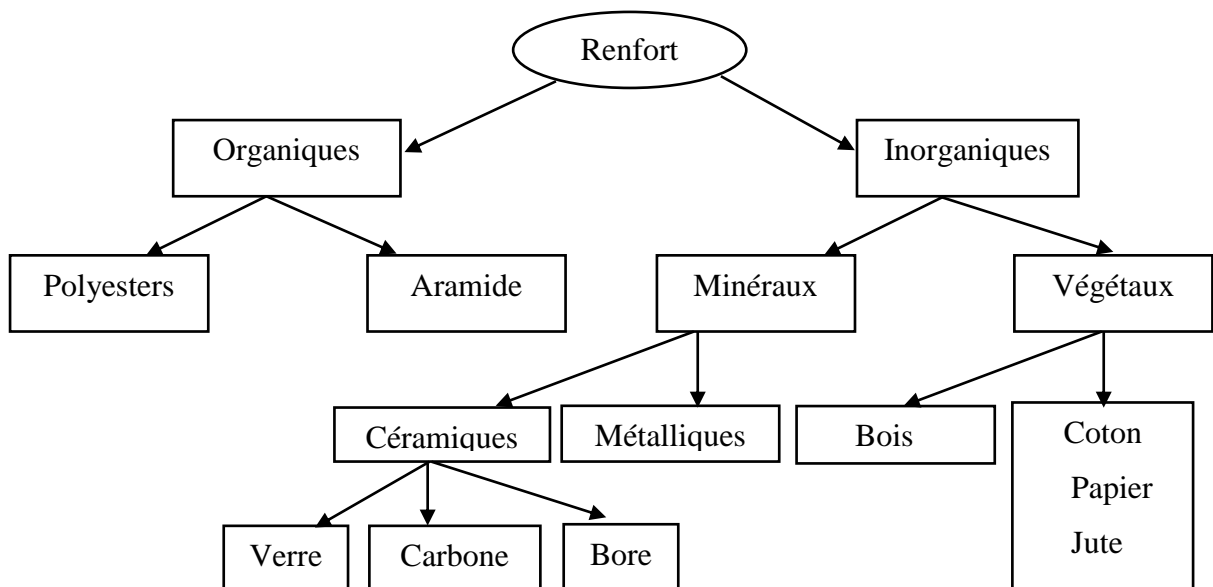


Figure II. 2 : organigramme des principaux matériaux des renforts

1. Les différents types de renforts

La fibre est constituée de plusieurs filaments élémentaires dont les diamètres varient entre 5μ et 25μ . 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 (Poyodi, 2014).

a) Fibres de carbone :



Figure II. 3: Exemples des fibres de carbone

La fibre de carbone se compose des fibres extrêmement fines, d'environ 5 à $10 \mu\text{m}$ de diamètre, et elle est composée principalement d'atomes de carbone.

Suivant les conditions de fabrication, il existe toute une variété de fibres de carbone. Mais, actuellement trois sortes sont commercialisées :

- Les fibres 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 ci - dessous

Tableau II. 1: Propriétés des fibres de carbone

Propriétés en traction	HR		IM	HM	
	R_t	3000à5000	4000à4500	47000à52000	2000à2500
E_{0T}	220000à240000	235000à250000	275000à300000	350000à400000	450000à500000
$A_R(\%)$	1,2à1,5	1,6à1,8	1,4à1,6	0,5à0,7	0,3à0,5
Masse volumique (g / cm^3)	1,75à1,8	1,75à1,8	1,7à1,8	1,8à1,85	1,9à1,95

Nota: R_t : Résistance à la rupture; E_{0T} : Module de Young et 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.

b) 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 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, cordages et 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_t	3000	2700
E_{0T}	120000 à 130000	60000
A_r (%)	2.1	4
Masse volumique(g / cm ³)	1.45	1.44

Du point de vue dilatation, le Kevlar présente la même particularité dans le sens de fibres que celle du carbone.

c) Fibres d'aramide :

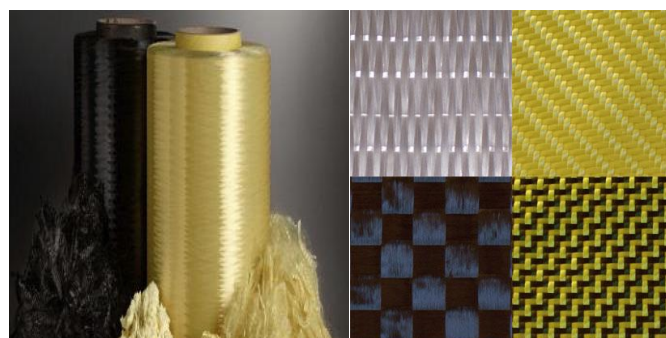


Figure II. 4: Fibres d'aramide

Constituée des chaînes de polymères alignées qui donnent une résistance et une rigidité plus importantes dans la direction longitudinale que dans la direction transversale. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

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

d) Fibres de verre :



Figure II. 5 : 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 présentées dans le tableau (II.3) (Poyodi, 2014).

Tableau II. 3 : Propriétés des fibres de Verre.

Propriétés en traction	Verre E	Verre R	Verre S
R_t	3400	4400	4900
E_{0T}	73000	86000	87000
A_R (%)	4.9	5.2	-----
Masse volumique(g / cm ³)	2.54	2.55	2.54

Remarque : les trois types des fibres sont utilisées dans les ouvrages de génie civil, mais pour le renforcement on utilise les composite a fibres de carbone qui s'imposent par leurs caractéristiques mécaniques

Autres types de fibres :

- **Fibre de bore :** Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat tungstène.



Figure II. 6: Fibres de bore

- **Fibre de silice (ou de quartz) :** Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée.
- **Fibres de polyéthylène de haut module :** Elles 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. {poyodi}

II.3.2. Les matrices

Les matrices lie les fibres du renfort entre eux et assure la répartition des contraintes c'est « l'emballage ». Elle assure également une protection chimique. Les matrices doivent présenter une bonne compatibilité avec le renfort. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevée. On distingue deux catégories de matrices:

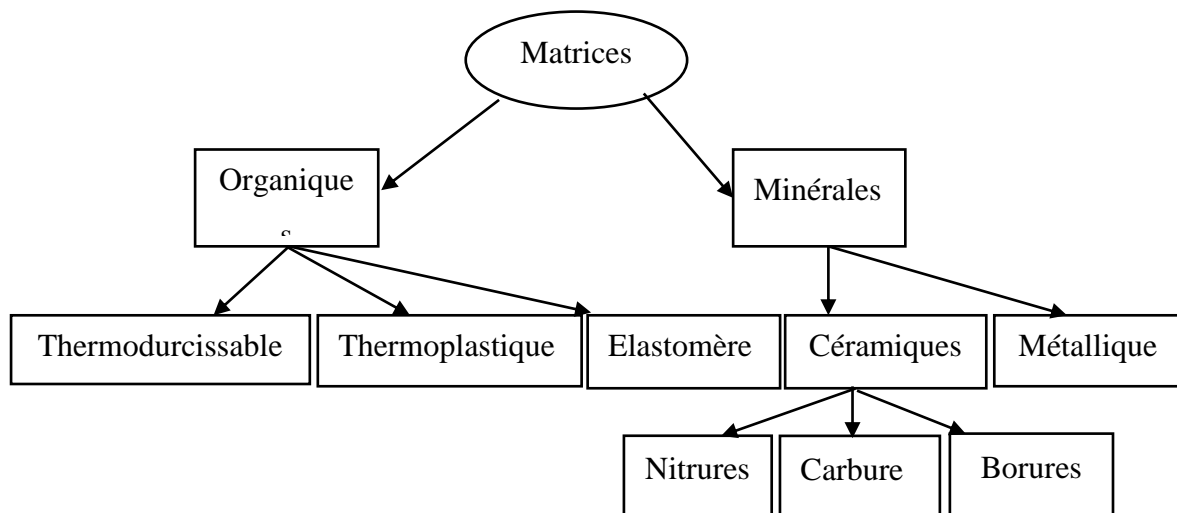


Figure II. 7: organigramme des principaux matériaux des matrices

1. Les matrices minérales

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

2. Les matrices organiques

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

a) Résine thermodurcissable(TD) :

Les résines thermodurcissables sont employées comme matrice des matériaux composites structuraux. Comme leur nom le laisse indiquer, 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 fait pas et ne se ramollit pas en température.

De ce fait, ils ne peuvent être mis en forme qu'une seule 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) 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_{0T} (MPa)	30 à 90	30 à 100	$\cong 90$	20 à 60	20 à 60
A_R (%)	2000à3000	2500à4000	$\cong 3000$	1000à5000	$\cong 3000$
Densité(g/cm ³)	1.1à1.3	1.1à1.3	$\cong 1.3$	1.2à1.4	1à1.1

b) Résine thermoplastique (TP):

Les résines thermoplastiques chauffées, 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 par leur mise en œuvre qui est grandement facile. Les variétés qui pourraient être appliquées sont : les poly sulfones, les polycarbonates et le nylon polyester thermoplastique.

Remarque : les matériaux composites ,les plus répandus sont ceux à matrice organique (résine thermodurcissable, résine thermoplastique).

II.4. Les charges et 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 dans le cas d'additifs. Les propriétés particulières qui peuvent généralement être améliorées portent sur les résistances mécaniques (compression) et les propriétés de mise en œuvre. Nous pouvons ainsi citer en exemple les charges renforçant qui se présentent sous forme sphérique (microbilles de verres) ou non sphérique (écailles de mica), les charges non renforçant qui ont pour rôle de diminuer le coût de la résine et peuvent contribuer à l'augmentation de certaines propriétés (masse volumique, dureté, module d'élasticité).

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

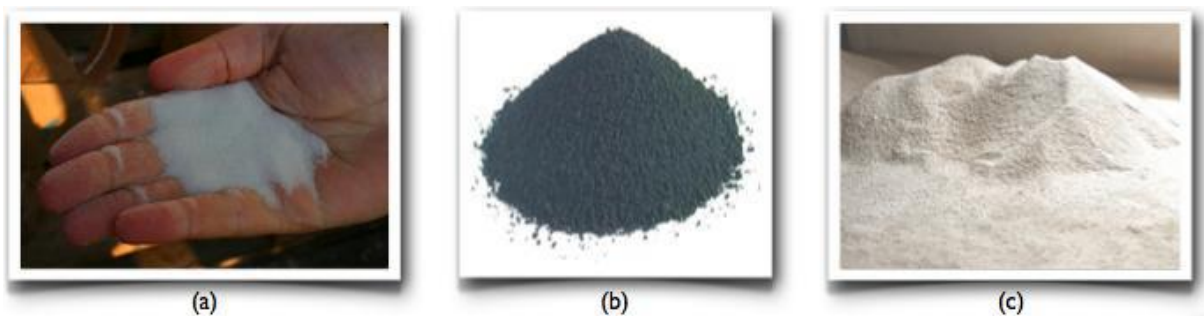


Figure II. 8: Exemples des charges : (a) microbilles de verre, (b) noir de carbone, (c) silice.

II.5. Les adhésifs

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

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

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 (Poyodi, 2014).

II.6. Avantages et inconvénients des composites

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

- Leur légèreté
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit.

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion :

- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication
- La gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte

II.7. Domaines d'application des composites

Les composites entrent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines d'applications possibles : Piscines, bassins, bâtiments, les transports aériens, maritime, routier, ferroviaire, sports, loisirs

II.7.1. Les composites et la construction électrique

La consommation massive des composites dans les domaines électrique et électronique, prend de l'ampleur avec l'utilisation importante de l'audiovisuel (TV, microordinateurs, lecteurs DVD...etc.).

En utilisant les propriétés remarquables des matériaux composites, la construction électrique réalise des équipements fiables, aux fonctions multiples et longue durée de vie.

II.7.2. Les composites dans l'aéronautique

L'aéronautique utilise principalement des composites hautes performances constituées d'une matrice époxy associée à un taux élevé de renforts en fibres de carbone.

L'aéronautique utilise les composites hautes performances pour la fabrication de pièces de structure primaire des appareils en raison de leur légèreté, de leur souplesse de forme et des économies de frais de maintenance qu'ils engendrent.

II.7.3. Les composites dans le ferroviaire

Les matériaux composites sont utilisés dans le domaine ferroviaire pour deux principaux atouts :

- Un bon comportement au feu .
- Un moulage facile des pièces utilisées.

II.7.4. Les composites dans la construction civile

L'utilisation des composites dans la construction civile est un nouveau créneau, qui commence à intéresser nos bâtisseurs. Le nombre de dégâts causés par les séismes à travers le monde a poussé les chercheurs à s'intéresser aux composites.

Le handicap majeur de l'utilisation des matériaux composites dans la construction civile, reste leur coût, qui est encore excessif.

L'utilisation des composites renforcés de fibres de carbone, en complément des composites à fibre de verre (TD et TP) pourra se développer dans le secteur de la construction civile lorsque leur prix deviendra inférieur.

Les composites apportent au bâtiment la souplesse des formes, la résistance aux contraintes climatiques, et les composites renforcés de fibres de carbone la résistance aux séismes.

II.8. Conclusion

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

On a vu dans ce chapitre tout ce qui concerne les matériaux composites, leur domaine d'application (aéronautique, les transports aériens, maritime, routier, ferroviaire, sports, loisirs et construction), leurs avantages (grande rigidité, résistance à la corrosion, isolation thermique et phonique ...) et leurs inconvénients (mauvaise tenue à la chaleur, sensibilité de ces matériaux aux impacts...), leurs caractéristiques mécaniques.

L'utilisation des composites dans le domaine de construction montre que c'est une excellente alternative aux solutions traditionnelles.

III.1. Introduction

Ce chapitre est une analyse d'interface améliorée est présentée pour supporter une poutre métallique collée avec une plaque métallique ou composite ; ce qui a été objet des recherches ces dernières années. Il est montré que les contraintes de cisaillements et normales à l'interface sont influencées par le matériau et les caractéristiques géométriques de la poutre.

La détermination des contraintes d'interface a été recherchée concernant les poutres en acier ou en béton renforcées par des plaques en acier ou en matériaux composites, plusieurs solutions analytiques ont été développées. Elles sont toutes valables pour les matériaux élastiques linéaires et utilisent la même hypothèse c'est-à-dire que l'adhésif est sujet à des contraintes normales et de cisaillement qui sont constantes à travers l'épaisseur de la couche adhésive. C'est cette hypothèse qui permet d'obtenir des solutions relativement simples. Des techniques très récentes sont mises au point (modélisations, expériences...) telles que les différents types de collage utilisant les matériaux composites (carbodor, tissu) qui donnent 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, du composite et permet l'évaluation des contraintes d'interface, dont la connaissance est très importante dans la conception de telles structures.

III. 2. Hypothèses de la présente méthode

Dans la présente analyse, 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 rôle le transfert des contraintes de la poutre au composite.
- Les déformations de l'adhérent 1 et 2 sont dues aux moments de flexion et aux efforts normaux.

Après une analyse de la méthode présentée par Benachour pour les poutres métalliques, une modélisation s'en suit afin de valider la présente méthode.

III. 3. Analyse

Un élément dx de la poutre renforcée (figure III.1) est représenté dans la (figure III.2).

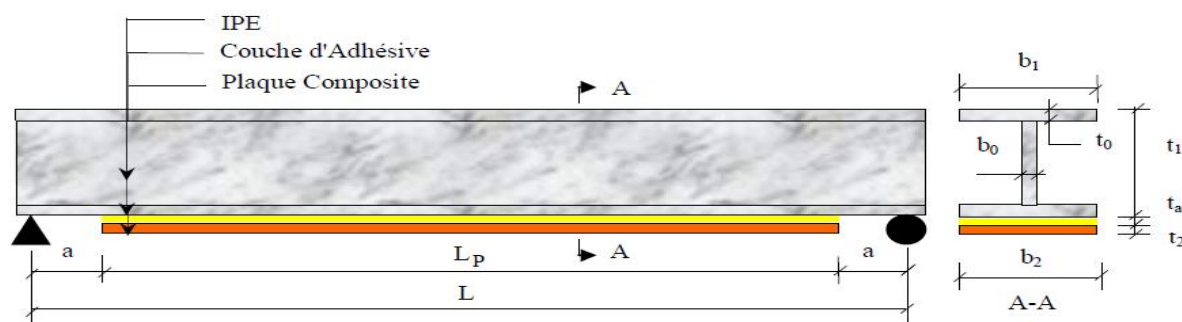


Figure III. 1: Poutre métallique en I simplement appuyée renforcée par une plaque composite

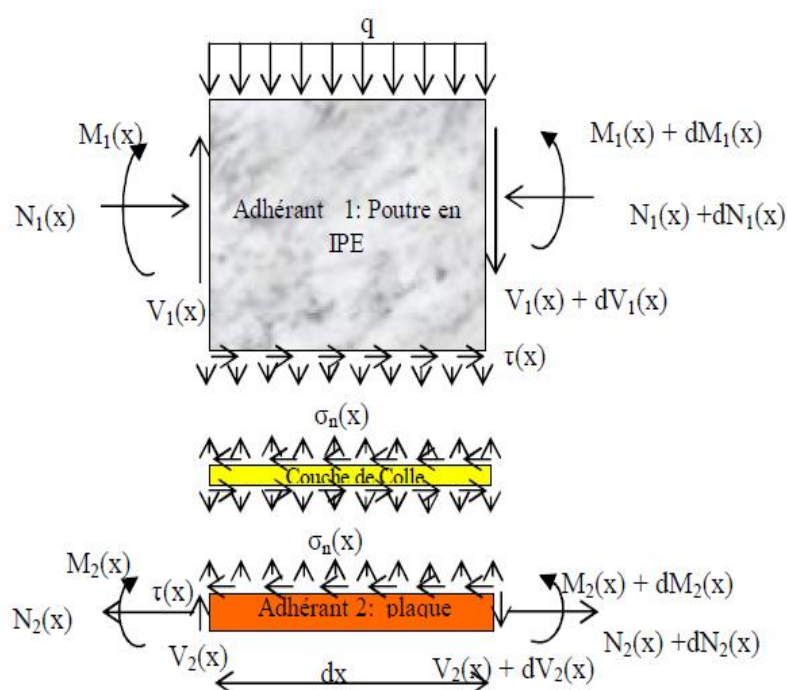


Figure III. 2 : Un segment différentiel de la poutre métallique renforcée par collage de composite

III. 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 :

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

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

$u_1(x)$ 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.

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

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

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:

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

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

Où : A_1 et A_2 sont les sections transversales de l'adhérent 1 et 2 respectivement.

$N_1(x)$ et $N_2(x)$ sont les forces axiales de l'adhérent 1 et 2 respectivement.

Il faut noter que : ξ est un coefficient qui tient compte de la forme géométrique de la section étudiée ; il est donné par :

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

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 (III.3), (III.4) et (III.5) dans les équations (III.1) et (III.2) respectivement, les équations de déformations précédentes deviennent :

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

Et

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

Comme la poutre est une IPE on a :

$$A_1 = 2b_1 t_0 + b_0(t_1 - 2t_0) \quad (\text{III.9})$$

Et

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

III. 3.2 La 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 :

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

Avec : $u_1(x)$ 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.

Où G_a et t_a sont respectivement le module de cisaillement et l'épaisseur de l'adhésive.

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

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

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

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

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

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

L'équilibre horizontal donne :

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

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

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

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

Avec : b_2 est 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 :

$$M_1(x) = RM_2(x) \quad (\text{III.19})$$

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

L'équilibre de l'élément de la (figure III.2) permet d'écrire :

$$M_T(x) = M_1(x) + M_2(x) + N(x)(y_1 + y_2 + t_a) \quad (\text{III.21})$$

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 (III.15), (III.16), et (III.19) dans l'équation (III.21), On tire :

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

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

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

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

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

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

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} = K_s \left[\frac{-y_2}{E_2 I_2} \left(\frac{1}{(R+1)} [V_T(x) - b_2 (y_1 + y_2 + t_a) \tau(x)] \right) + \frac{b_2}{E_2 A_2} \tau(x) - \right.$$

$$\frac{y_1}{E_1 I_1} \left(\frac{R}{(R+1)} [V_T(x) - b_2(y_1 + y_2 + t_a)\tau(x)] + \frac{b_2}{E_1 A_1} \tau(x) \right) - K_s \left[\frac{t_2}{3G_2} + \frac{t_1}{3G_1} \xi \right] \frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} \quad (\text{III.26})$$

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

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

$$\text{Avec : } K_1 = \frac{1}{\frac{t_a}{G_a} + \frac{t_2}{3G_2} + \frac{t_1}{3G_1} \xi}$$

(III.28)

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

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

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

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

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

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

III. 3.3 Application des conditions aux limites

Pour l'application 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 :

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

En considérant les conditions initiales on a :

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

A la fin de la plaque composite, on a :

$$N_1(0) = N_2(0) = M_2(0) = 0 \quad (\text{III.33})$$

$$\text{On sait que : } M_1(0) = M_T(0) = \frac{qa}{2}(L - a) \quad (\text{III.34})$$

En remplaçant $x=0$ dans l'équation (III.13), on tire l'expression suivant :

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

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

$$\text{On obtient : } \frac{d\tau(x=0)}{dx} = -\frac{m_2 qa}{2} (L-a) \quad (\text{III.36})$$

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

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

En substituant (III.37) dans l'équation (III.29) puis en dérivant l'équation (III.29) substituée on remplace $x=0$ puis on tire la constante B_2 .

$$\text{Sachant que } \sinh(0) = 0 \quad \text{et} \quad \cosh(0) = 1$$

On trouve alors :

$$B_2 = -\frac{m_2 qa}{2\lambda} (L-a) + \frac{m_1}{\lambda} qI \quad (\text{II.39})$$

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

$$B_1 = -B_2 \tanh\left(\lambda \frac{L_P}{2}\right) \quad (\text{III.40})$$

$$\text{Comme dans les cas pratiques } \frac{\lambda L_P}{2} > 10 \longrightarrow \tanh\left(\frac{\lambda L_P}{2}\right) \approx 1$$

$$\text{D'où : } B_1 = -B_2 \quad (\text{III.41})$$

$$\text{On sait que : } \sinh(\lambda x) = \frac{e^{\lambda x} - e^{-\lambda x}}{2} \quad \text{et} \quad \cosh(\lambda x) = \frac{e^{\lambda x} + e^{-\lambda x}}{2} \quad (\text{III.42})$$

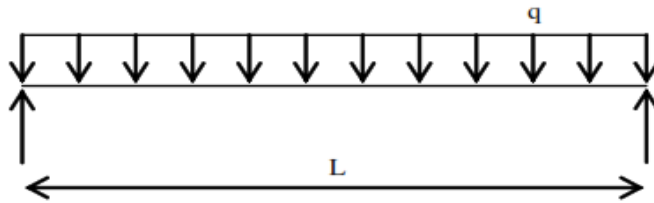


Figure III. 3: IPE renforcé par composite sous chargement uniformément répartie

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

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

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

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

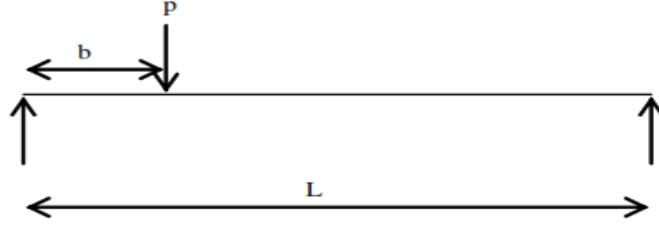


Figure III. 4 : IPE renforcé par composite sous une charge concentrée P

$$a < b : \tau(x) = \begin{cases} \frac{m_2}{\lambda} Pa(1 - \frac{b}{L})e^{-\lambda x} + m_1 P(1 - \frac{b}{L}) - m_1 PCosh(\lambda x)e^{-k} \longrightarrow 0 \leq x \leq (b-a) \\ \frac{m_2}{\lambda} Pa(1 - \frac{b}{L})e^{-\lambda x} - m_1 P \frac{b}{L} + m_1 PSinh(k)e^{-\lambda x} \longrightarrow (b-a) \leq x \leq L_p \end{cases} \quad (III.44)$$

$$a > b : \tau(x) = \frac{m_2}{\lambda} Pb(1 - \frac{a}{L})e^{-\lambda x} - m_1 P \frac{b}{L} ; 0 \leq x \leq L_p \quad (III.45)$$

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

Dans la même optique de l'application des conditions aux limites dans le cas de deux (02) charges ponctuelles, on obtient l'expression ci-dessous :

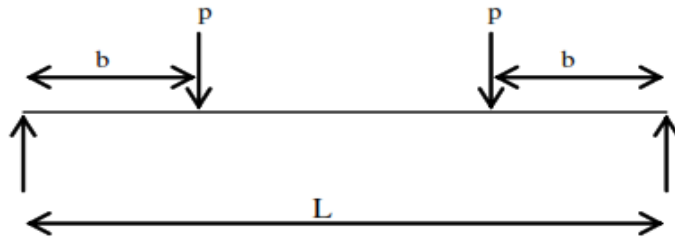


Figure III. 5 : IPE renforcé par composite sous deux charges concentrées symétriques

$$a < b : \tau(x) = \begin{cases} \frac{m_2}{\lambda} Pae^{-\lambda x} + m_1 P - m_1 PCosh(\lambda x)e^{-k} \longrightarrow 0 \leq x \leq (b-a) \\ \frac{m_2}{\lambda} Pae^{-\lambda x} + m_1 PSinh(k)e^{-\lambda x} \longrightarrow (b-a) \leq x \leq L_p \end{cases} \quad (III.46)$$

$$a > b : \tau(x) = \frac{m_2}{\lambda} Pbe^{-\lambda x} \quad 0 \leq x \leq L_p \quad (III.47)$$

III. 3.4 La distribution des contraintes normales dans l'interface composite – Acier

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

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

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 :

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

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

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

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

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

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

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

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

L'adhérent 1 :

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = V_1(x) - b_2 y_1 \tau(x) \quad \text{et} \quad \frac{dV_1(x)}{dx} = -b_2 \sigma_n(x) - q \quad (\text{III.53})$$

L'adhérent 2 :

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = V_2(x) - b_2 y_2 \tau(x) \quad \text{et} \quad \frac{dV_2(x)}{dx} = b_2 \sigma_n(x) \quad (\text{III.54})$$

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

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

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

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

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

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

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

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 :

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

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

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

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

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

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

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

III. 4. Vérification de la méthode

La présente méthode a été validée en effectuant une comparaison des résultats des contraintes d'interfaces avec ceux obtenus à partir des solutions analytiques telles que : la méthode de Benachour. Pour une poutre endommagée simplement appuyée, le renforcement par composites de types Carbodur, tissu, FGM et FGM Sandwich, soit des plaques métalliques est analysé.

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

Tableau III. 1: Propriétés géométriques et mécaniques des matériaux

Composantes	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Module de Young(MPa)	Coefficient de poisson	Module de cisaillement
Adhésif	$b_a = 100$	$t_a = 1$	$E_a = 4500$	0,3	–
Carbodur	$b_2 = 100$	$t_2 = 1.2$	$E_2 = 165000$	0,28	$G_{1,2} = 5800$
TFC	$b_2 = 200$	$t_2 = 0.48$	$E_2 = 230000$	0,28	$G_{1,2} = 8200$
Plaque métallique	$b_2 = 200$	$t_2 = 2$	$E_2 = 200000$	0,3	–
FGM	$b_2 = 100$	$t_2 = 2$	$E_c = 380000$ $E_m = 70000$	0,3	–
FGM sandwich	$b_2 = 100$	$t_2 = 4$	$E_c = 380000$ $E_m = 70000$	0,3	–
Poutre métallique	$b_1 = 100$ $b_0 = 5.6$	$t_1 = 200$ $t_0 = 8.5$	$E_1 = 210000$	0,3	–

Tableau III. 2: Autres paramètres

Composantes	Valeurs
Charge répartie	$q = 55.8 \text{ kN/ml}$
Charge concentrée	$P = 156 \text{ kN}$
Deux charges concentrées	$P = 78 \text{ kN}$
Longueur totale (entre appuis)	$L = 2800 \text{ mm}$
Longueur plaque de renforcement	$L_p = 2400 \text{ mm}$
Longueur non renforcée	$a = 200 \text{ mm}$

III. 4. 1. Comparaison analytique de la présente méthode avec des résultats issus de la littérature

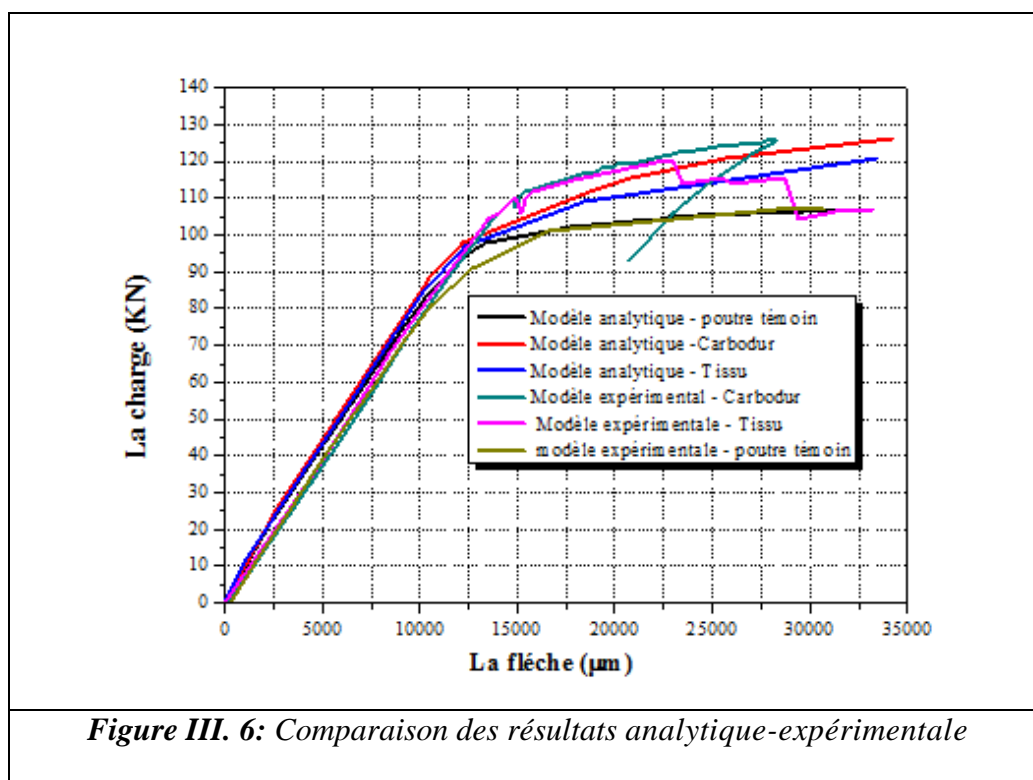
Les résultats obtenus à partir des solutions analytiques pour les contraintes maximales de la présente méthode coïncident avec ceux issus de la méthode de Benachour 2008 comme il est illustré dans le tableau (III.3).

Tableau III. 3 : Tableau comparatif des contraintes maximales (en MPa)

Poutre sous un chargement répartie $q=55.8$ kN/ml										
Type de renforcement	Carbodur		TFC (tissu)		Plaque métallique		plaque FGM		Plaques FGM Sandwich	
	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ
Présente Méthode	4.752	1.787	3.558	0.985	6.795	3.877	6.216	3.602	7.934	5.868
Benachour 2008	6.964	2.457	5.241	1.388	9.882	5.376	9.059	49906	11.488	7.9659
Poutre sous une charge concentrée au milieu $P=156$ kN										
Type de renforcement	Carbodur		TFC (tissu)		Plaque métallique		plaque FGM		Plaques FGM Sandwich	
	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ
Présente Méthode	5.142	1.935	3.844	1.064	7.374	4.210	6.741	3.908	8.624	6.383
Benachour 2008	7.5191	2.654	5.653	1.497	10.689	5.819	9.794	5.399	12.439	8.634
Poutre sous deux charges concentrées symétriques $P=78$ kN										
Type de renforcement	Carbodur		TFC (tissu)		Plaque métallique		plaque FGM		Plaques FGM Sandwich	
	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ
Présente Méthode	4.773	1.747	3.631	0.989	6.654	3.728	6.129	3.485	7.659	5.507
Benachour 2008	7.150	2.466	5.440	1.423	9.969	5.337	9.183	4.976	11.475	7.758

III. 4. 2. Efficacité du renforcement des poutres métallique : *Comparaison analytique expérimentale*

L'utilisation de matériaux composites associé à des colles sur des surfaces tendues est un moyen très efficace pour renforcer les poutres de structure, plus particulièrement pour les poutres sous dimensionnées. Le collage du composite sur des surfaces tendues augmente la résistance ultime des poutres renforcées et en diminuant la flèche des structures (figure III.6), il augmente également leur raideur. Ce phénomène permet de diminuer la corrosion des d'améliorer la durabilité des structures renforcées.



III.4.3. Comparaison analytique de la présente méthode avec des résultats issus de la littérature en tenant compte l'effet de la précontrainte

La validation de la présente méthode permet de faire une étude comparative afin de montrer les avantages de cette nouvelle approche qui consiste à appliquer une force de précontrainte sur la plaque composite de renforcement, vu que cette dernière résiste bien à la traction et qui offre un gain économique en rigidité pour la poutre renforcé. A la lumière des résultats obtenus et en fonction des caractéristiques mécaniques des matériaux ; nous pouvons dire que cette nouvelle technique est très efficace.

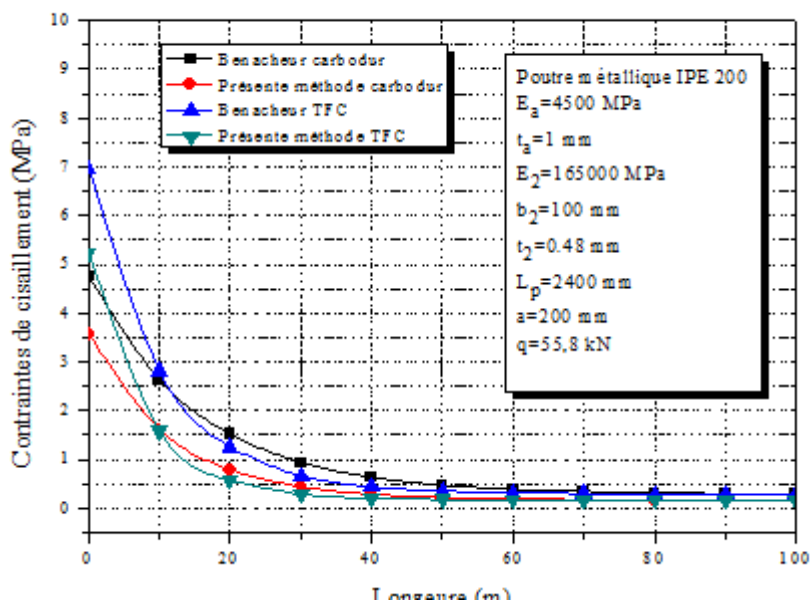
Tableau III. 4: Comparaison des contraintes d'interface (en MPa) pour $P_0=20kN$ sous différents chargements

Poutre sous un chargement répartie $q=55.8$ kN/ml										
Type de renforcement	Carbodur		TFC (tissu)		Plaque métallique		plaque FGM		Plaques FGM Sandwich	
	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ
Présente Méthode	-7.216	-2.487	-12.750	-3.405	-1.077	-0.472	-2.569	-1.323	1.526	1.363
Benachour 2008	-10.964	-3.620	-19.190	-4.948	-1.912	-0.877	-4.103	-2.071	1.889	1.577
Poutre sous une charge concentrée au milieu $P=156$ kN										
Type de renforcement	Carbodur		TFC (tissu)		Plaque métallique		plaque FGM		Plaques FGM Sandwich	
	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ
Présente Méthode	-6.825	-2.339	-12.464	-3.325	-0.498	-0.139	-2.045	-1.017	2.216	1.877
Benachour 2008	-10.408	-3.422	-18.778	-4.838	-1.105	-0.434	-3.368	-1.663	2.840	2.245
Poutre sous deux charges concentrées symétriques $P=78$ kN										
Type de renforcement	Carbodur		TFC (tissu)		Plaque métallique		plaque FGM		Plaques FGM Sandwich	
	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ
Présente Méthode	-7.194	-2.527	-12.677	-3.399	-1.218	-0.622	-2.656	-1.439	1.252	1.0015
Benachour 2008	-10.777	-3.611	-18.99	-4.912	-1.825	-0.916	-3.979	-2.086	1.876	1.3696

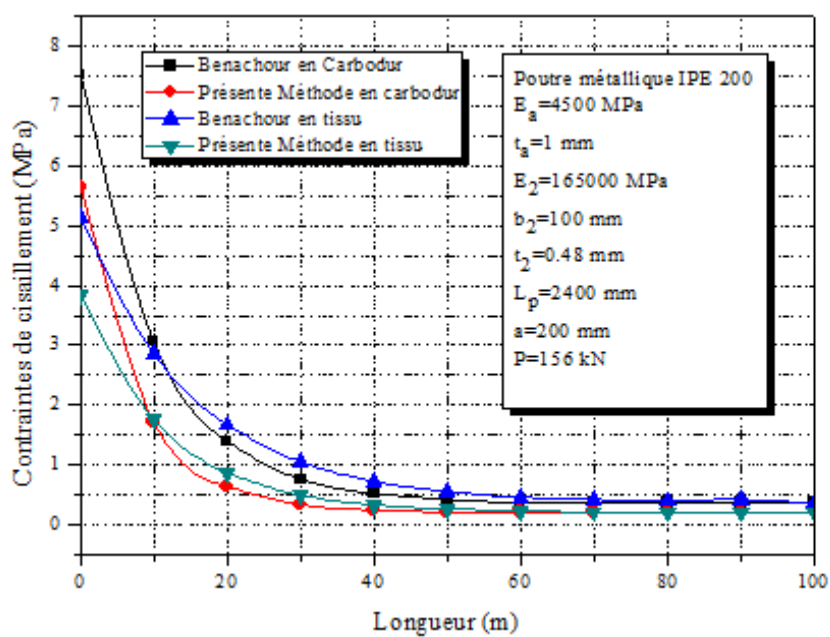
Tableau III. 5: Comparaison des contraintes d'interface (en MPa) pour $P_0=40kN$ sous différents chargements

Poutre sous un chargement réparti										
Type de renforcement	Carbodur		TFC (tissu)		Plaque métallique		plaque FGM		Plaques FGM Sandwich	
	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ
Présente Méthode	-19.184	-6.762	-29.058	-7.794	-8.949	-4.821	-11.355	-6.248	-4.881	-3.143
Benachour 2008	-28.894	-9.696	-43.622	-11.283	-13.706	-7.130	-17.265	-9.132	-7.711	-4.811
Poutre sous une charge concentrée au milieu										
Type de renforcement	Carbodur		TFC (tissu)		Plaque métallique		plaque FGM		Plaques FGM Sandwich	
	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ
Présente Méthode	-18.794	-6.614	-28.772	-7.714	-8.371	-4.488	-10.831	-5.942	-4.191	-2.629
Benachour 2008	-28.338	-9.499	-43.210	-11.174	-12.899	-6.687	-16.530	-8.724	-6.759	-4.144
Poutre sous deux charges concentrées symétriques										
Type de renforcement	Carbodur		TFC (tissu)		Plaque métallique		plaque FGM		Plaques FGM Sandwich	
	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ	τ	σ
Présente Méthode	-19.163	-6.802	-28.985	-7.789	-9.091	-4.971	-11.442	-6.365	-5.155	-3.504
Benachour 2008	-28.707	-9.689	-43.423	-11.247	-13.619	-7.169	-17.141	-9.147	-7.723	-5.019

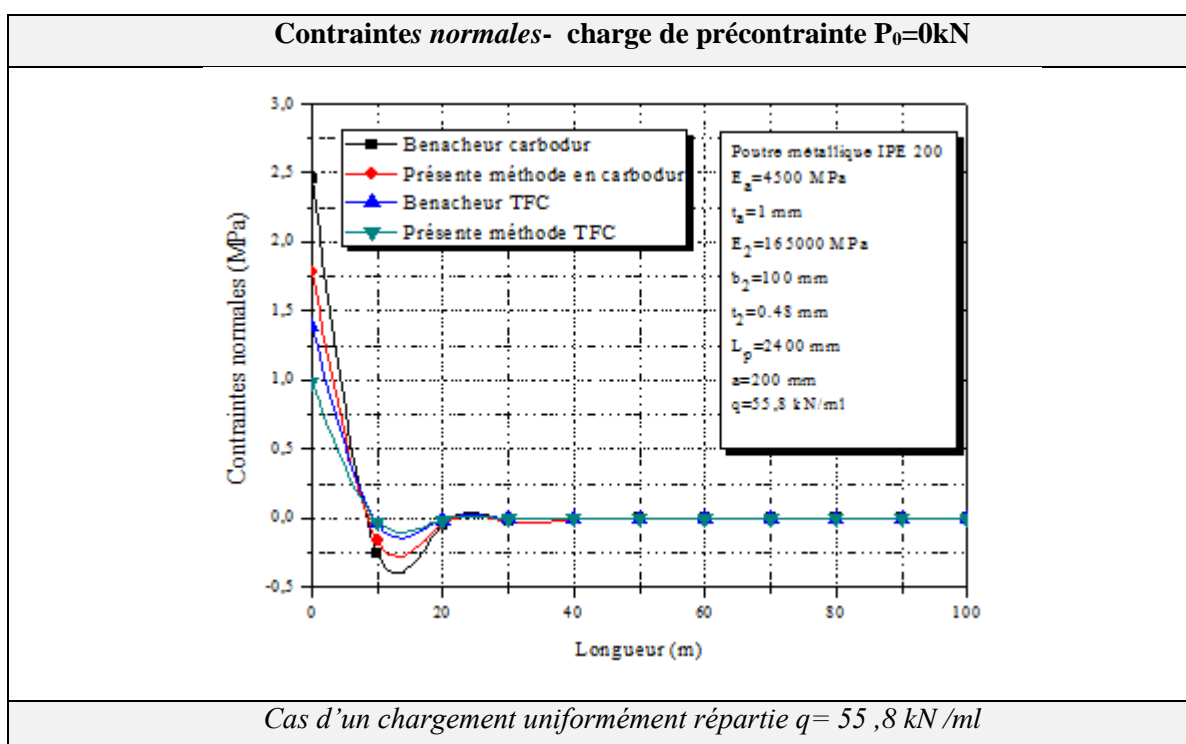
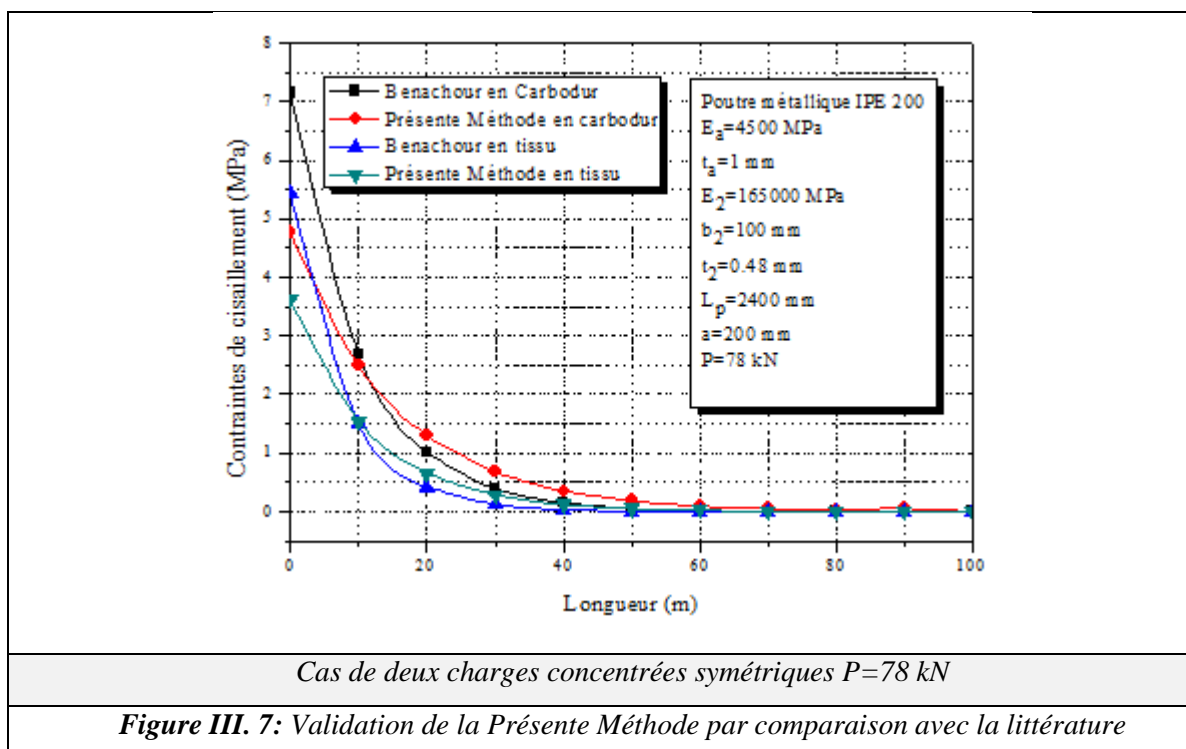
Contraintes de cisaillement- charge de précontrainte $P_0=0\text{kN}$

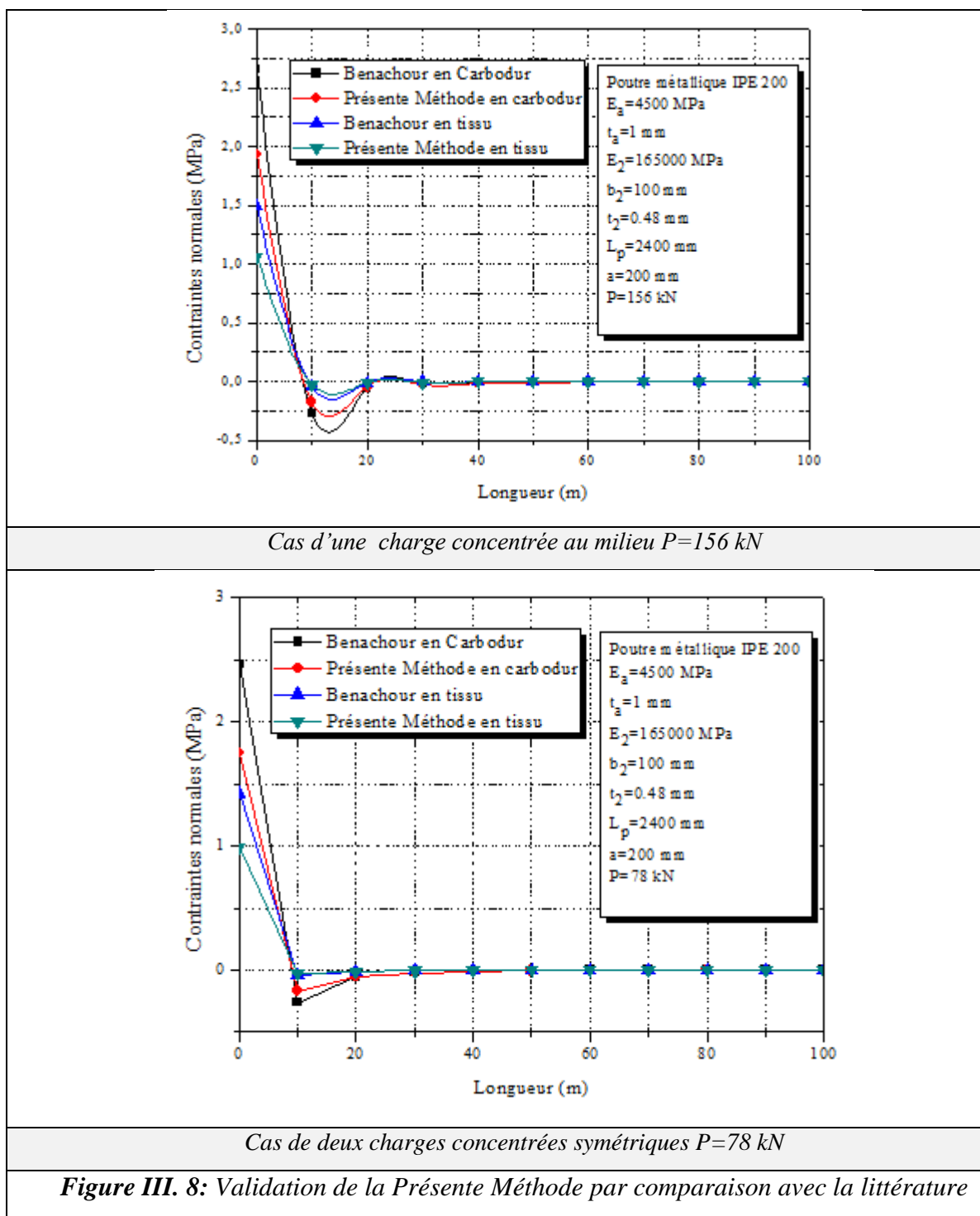


Cas d'un chargement uniformément réparti $q=55,8\text{ kN/ml}$

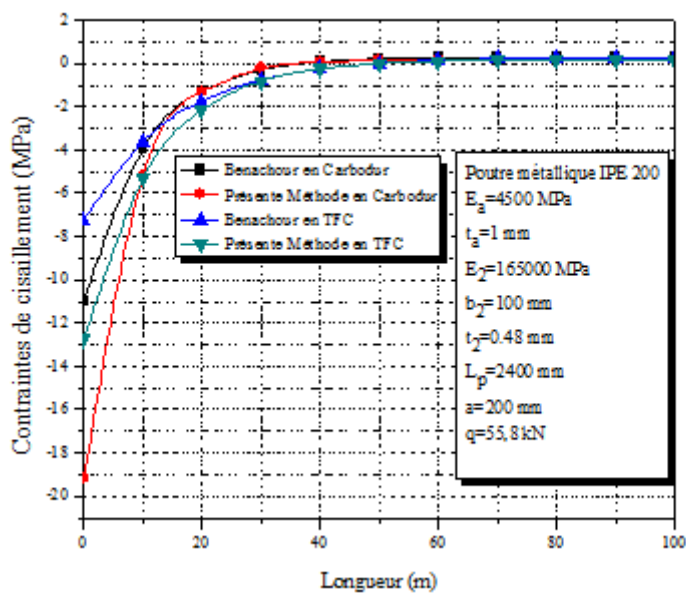


Cas d'une charge concentrée au milieu $P=156\text{ kN}$

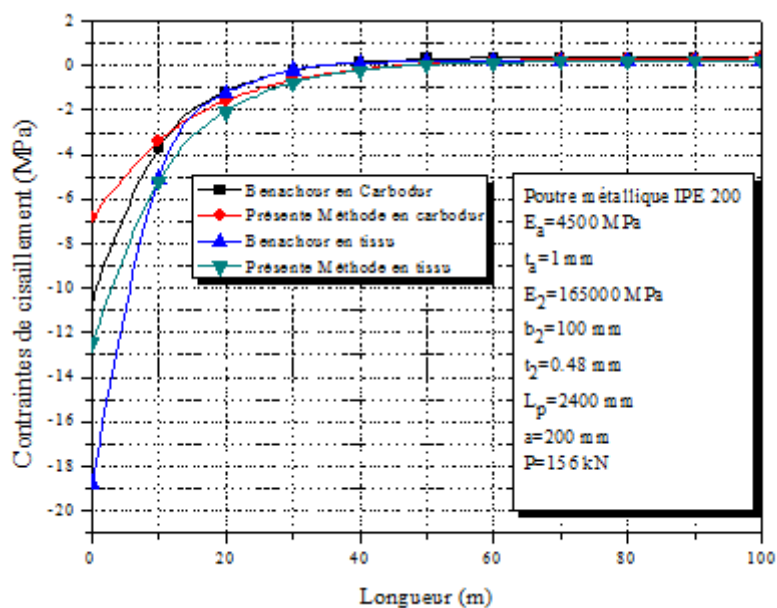




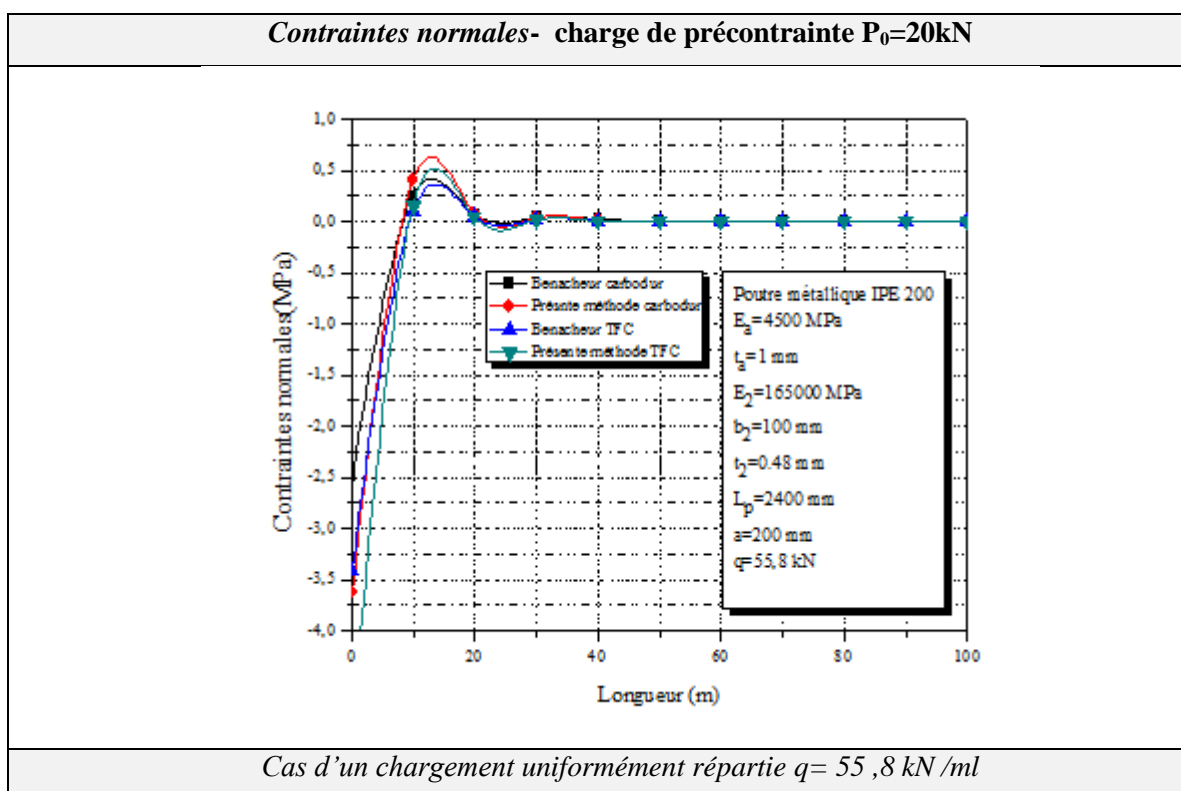
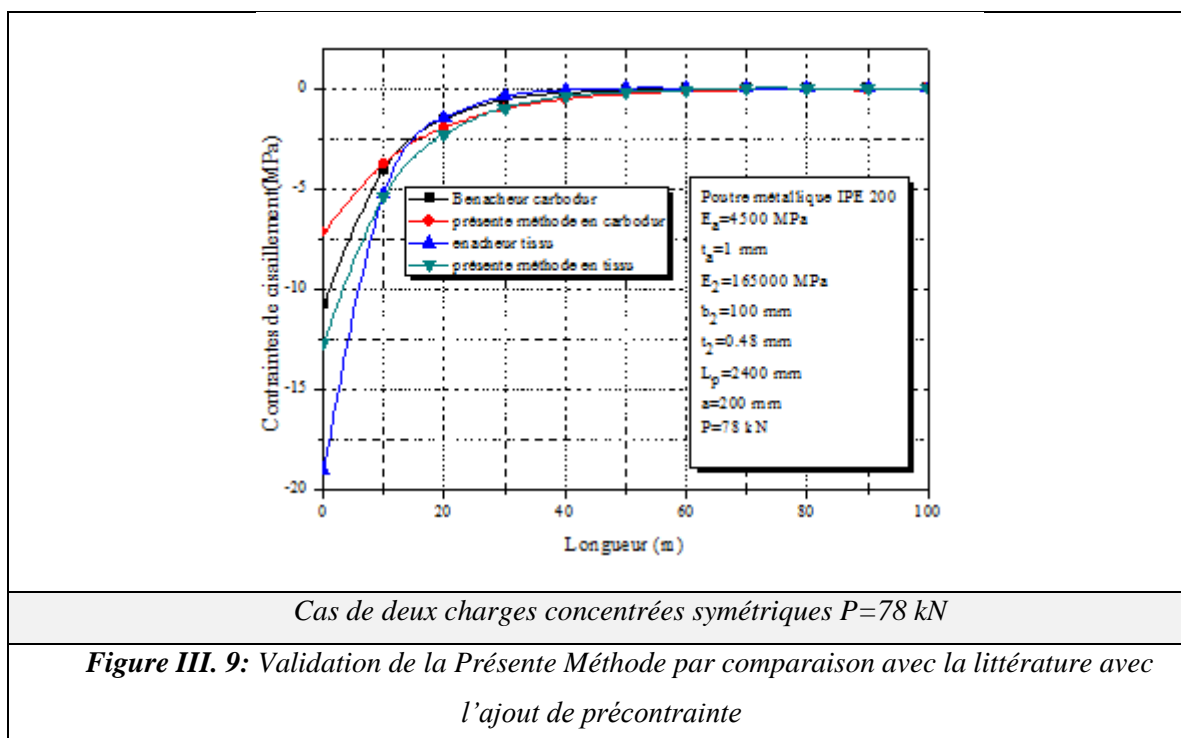
Contraintes de cisaillement- charge de précontrainte $P_0=20\text{kN}$

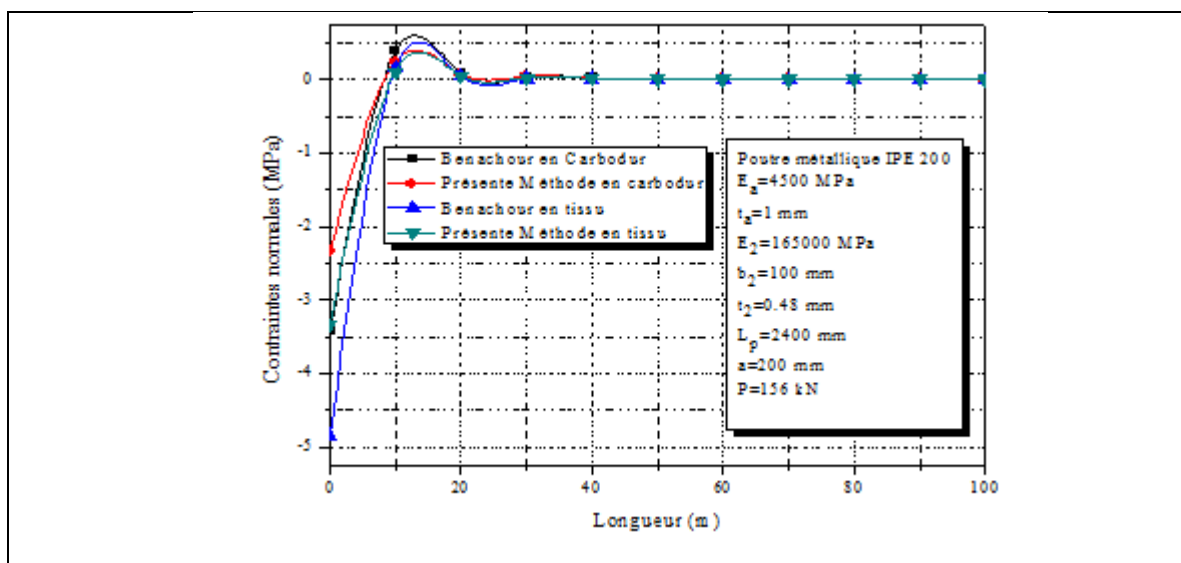


Cas d'un chargement uniformément réparti $q=55,8\text{ kN/ml}$

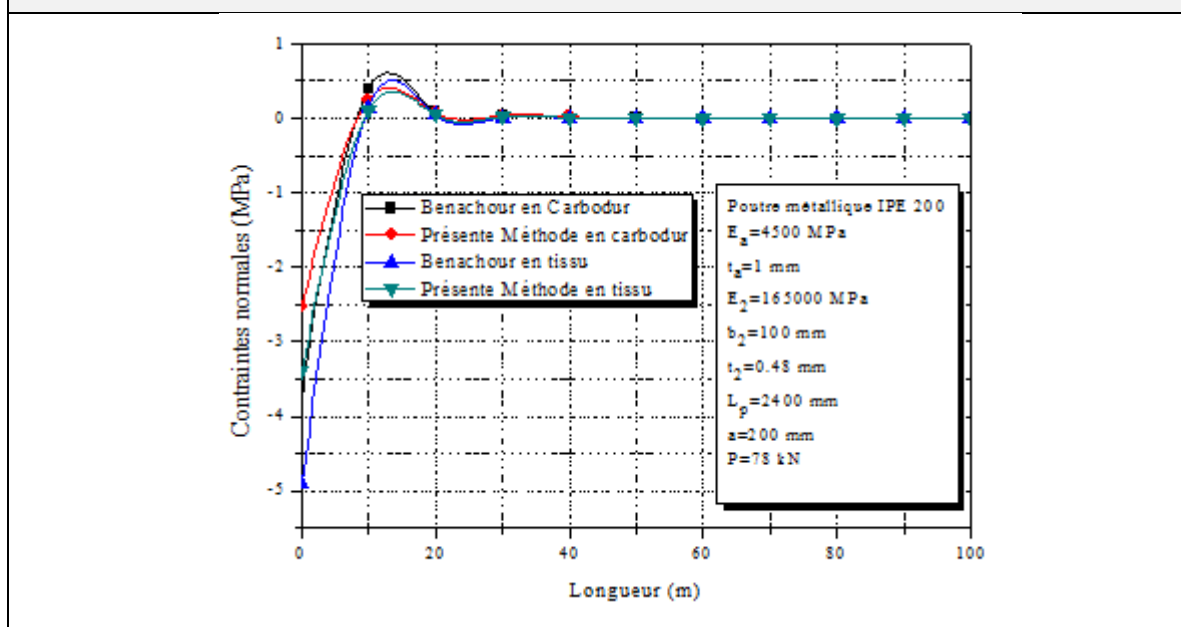


Cas d'une charge concentrée au milieu $P=156\text{ kN}$





Cas d'une charge concentrée au milieu $P=156\text{ kN}$



Cas de deux charges concentrées symétriques $P=78\text{ kN}$

Figure III. 10: Validation de la Présente Méthode par comparaison avec la littérature

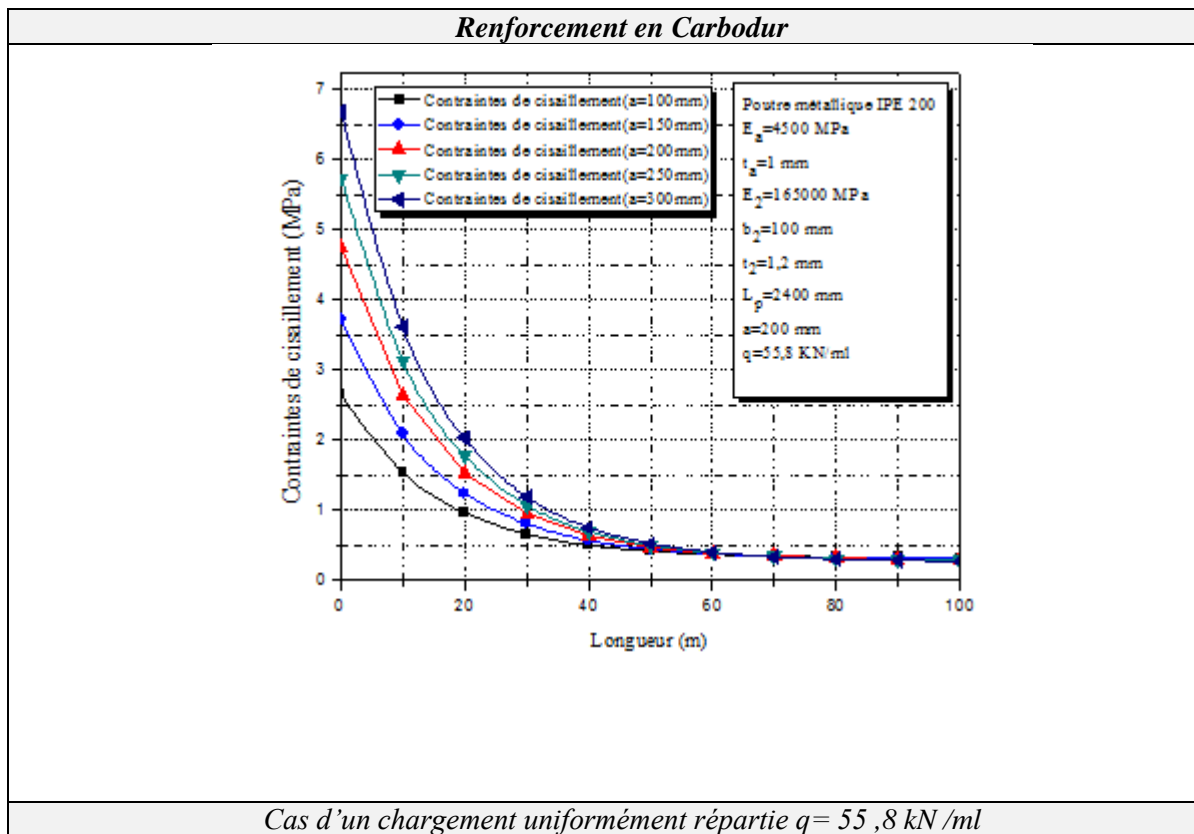
III.5.Conclusion :

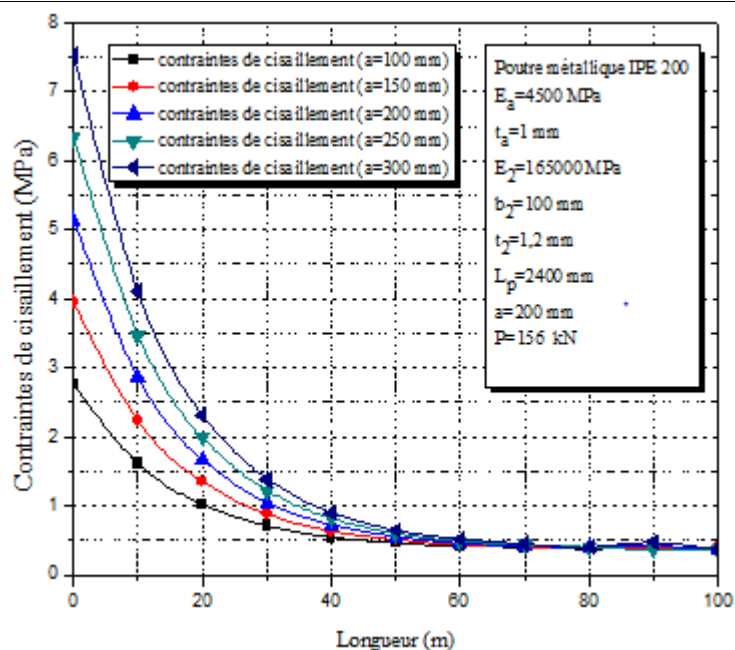
Dans la présente étude, une nouvelle analyse théorique des contraintes d'interfaces a été présentée avec les plaques de composites précontraintes et collées. Comparé aux solutions existantes, le modèle actuel est réel. Après la validation de cette nouvelle méthode avec celle de Benachour, il a été alors possible d'appliquer cette première. Les résultats prouvent qu'il existe une concentration élevée des efforts de cisaillement et de décollement aux extrémités.

IV.1.Introduction

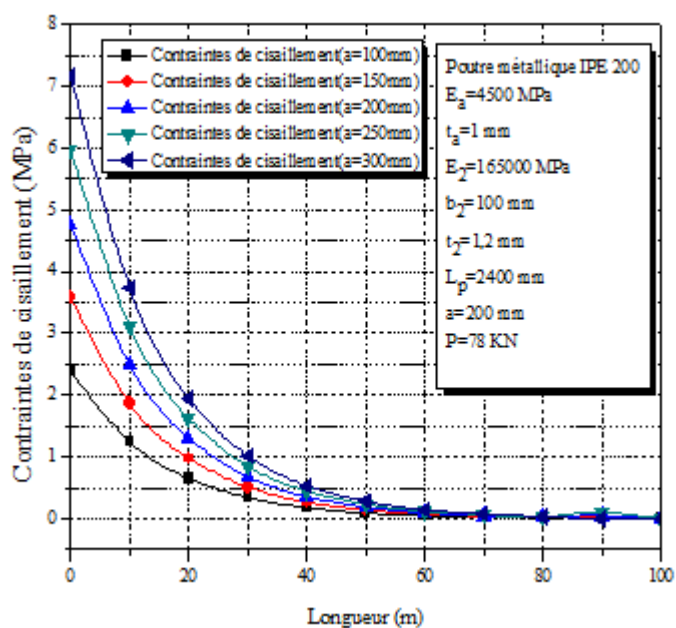
Divers paramètres influent sur les valeurs maximales des contraintes de cisaillement et des contraintes normales Pour les poutres renforcées. Dans ce chapitre nous présentons les résultats analytiques de l'effet de concentration des contraintes d'interfaces provoquant le délaminage de la plaque de renforcement. Parmi les paramètres que nous jugeons utile à présenter en utilisant la présente méthode pour les deux types de composites à savoir le carbodur et le tissu ; nous citons l'influence de la longueur non renforcée, le module d'élasticité de l'adhésif, l'épaisseur de la couche du composite, l'épaisseur de la colle ainsi que la fraction volumique des fibres.

IV.2.Effet de la longueur non renforcée « a »





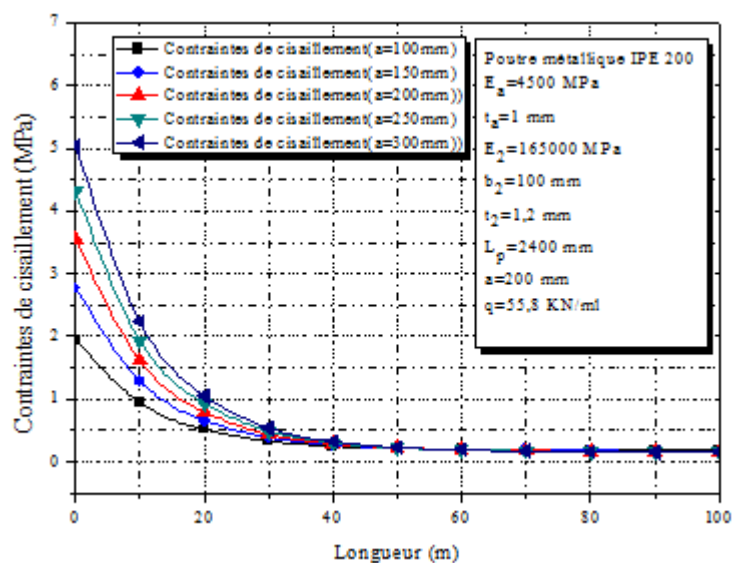
Cas d'une charge concentrée au milieu $P=156 \text{ kN}$



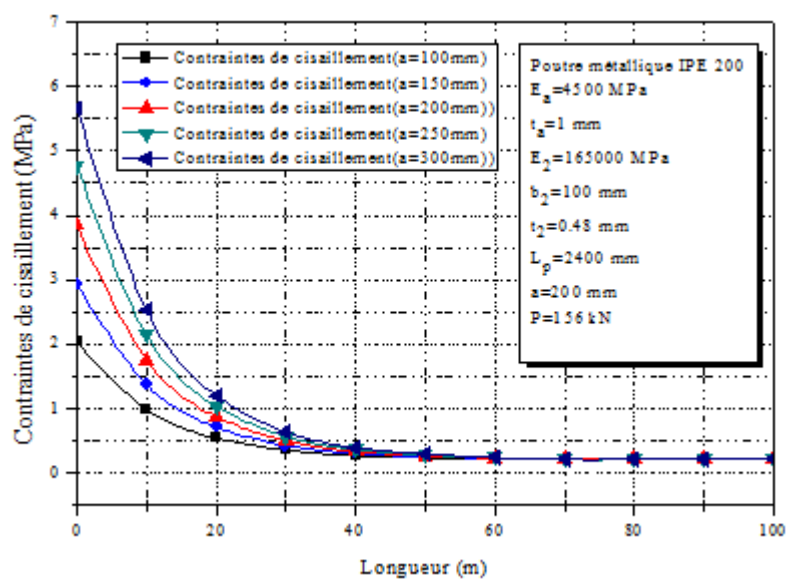
Cas de deux charges concentrées symétriques $P=78 \text{ kN}$

Figure IV. 1: Influence de la longueur non renforcé sur les contraintes de cisaillement d'un IPE renforcé par Cabodur

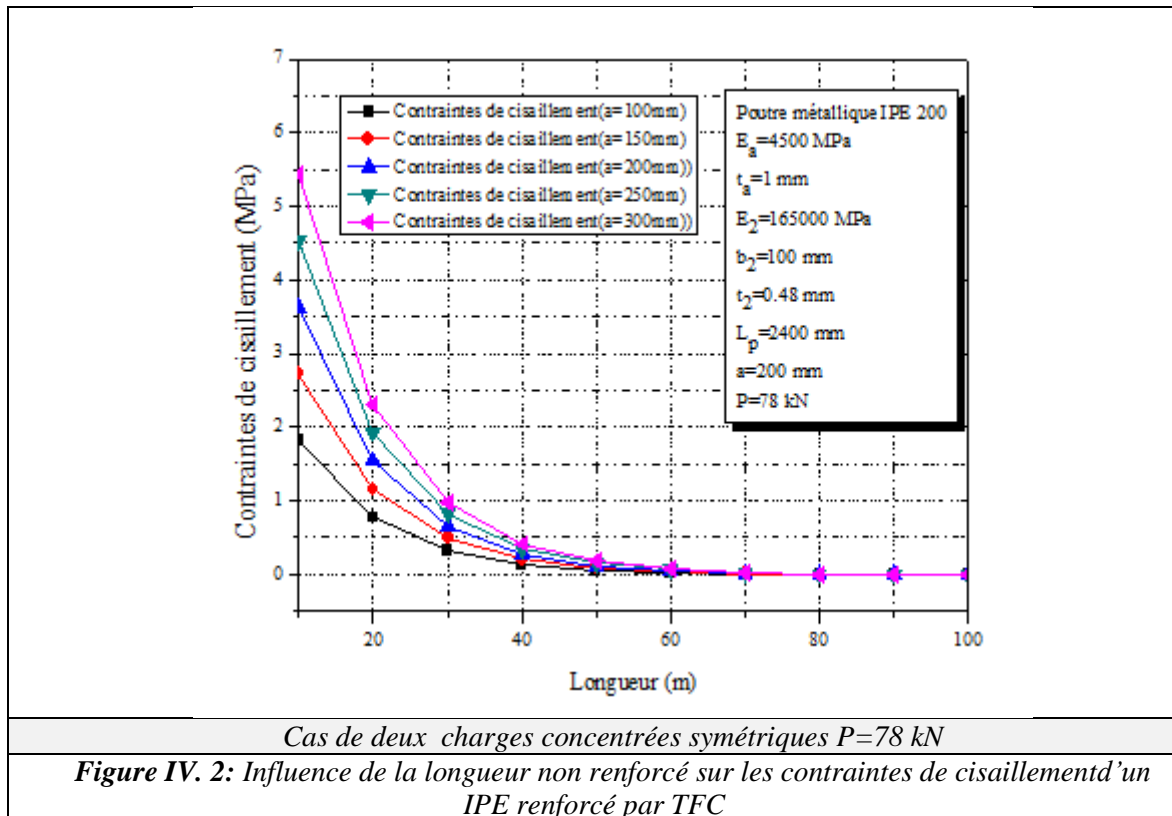
Renforcement tissu « TFC »



Cas d'un chargement uniformément répartie $q = 55,8 \text{ kN/ml}$

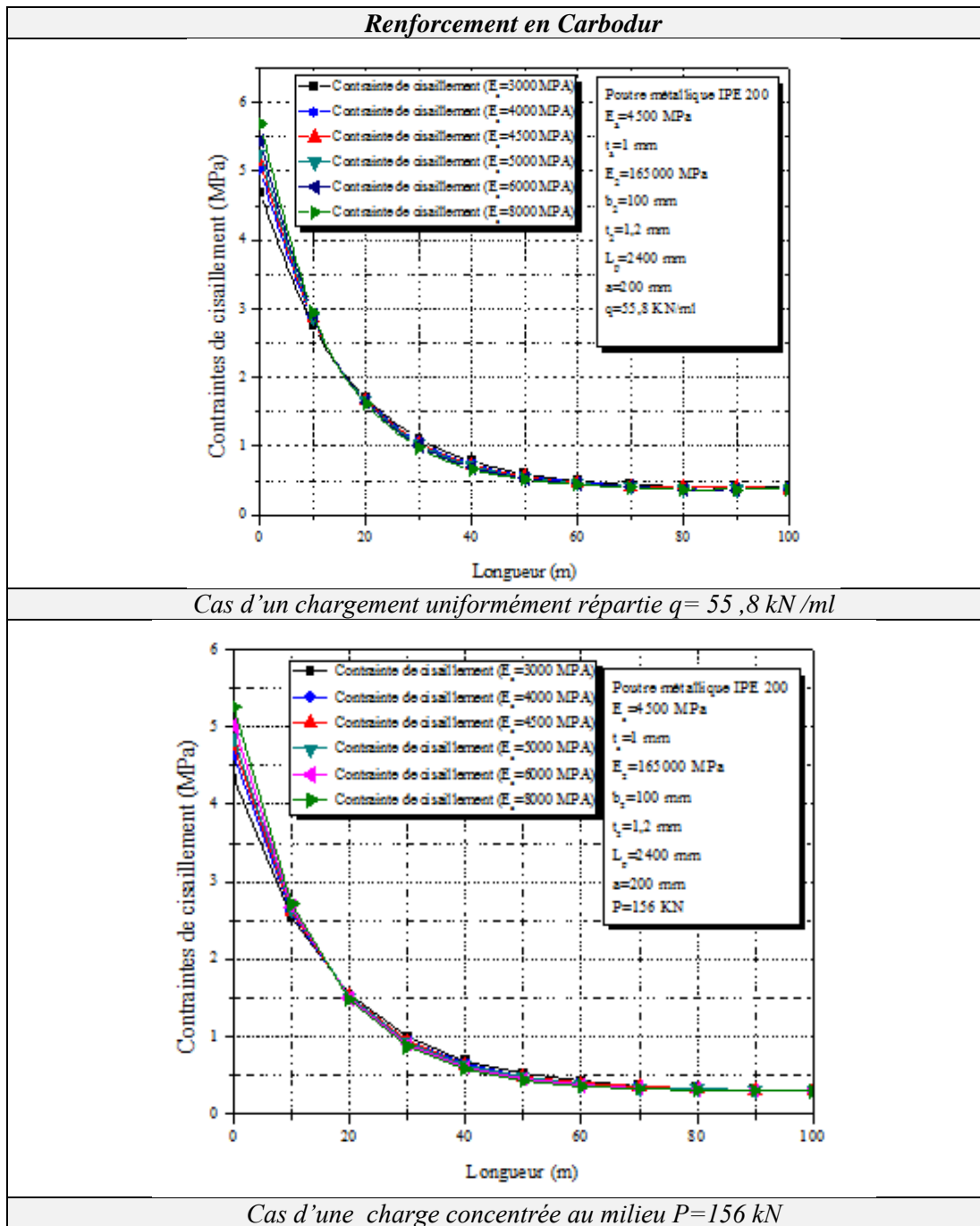


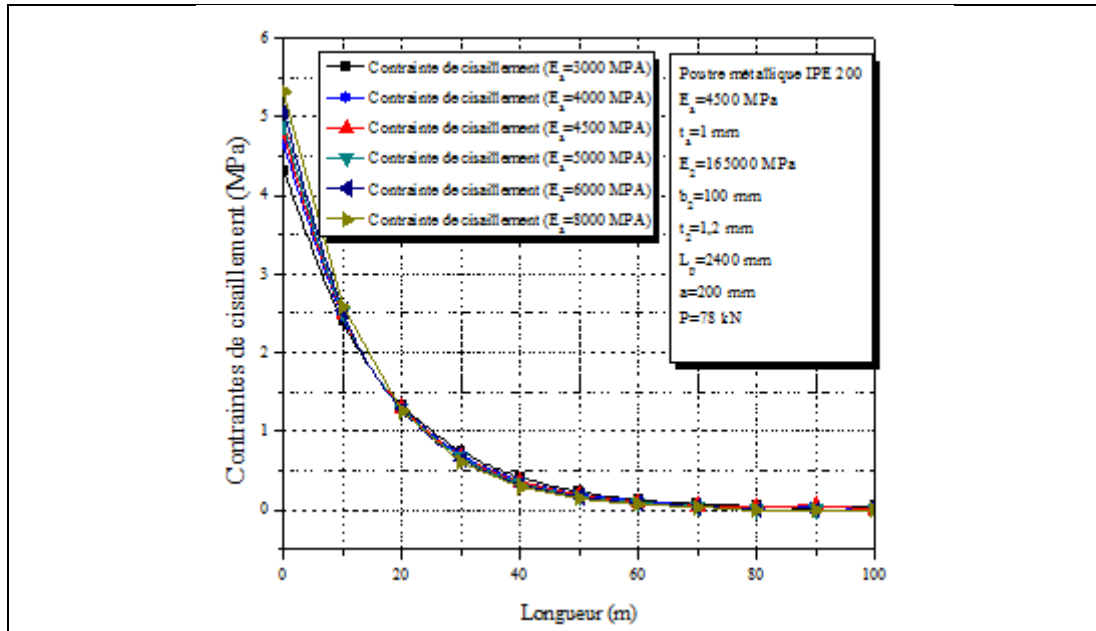
Cas d'une charge concentrée au milieu $P = 156 \text{ kN}$



L'influence de la longueur non renforcée (longueur entre le bord de la plaque et le support) sur les contraintes d'interface maximales est présentée sur les figures (IV.1 et IV.2). On constate que la longueur « a » est proportionnelle aux contraintes d'interface, à savoir que l'augmentation de cette longueur (c'est à dire la longueur de la plaque L_p diminue) mène à l'augmentation des contraintes d'interface maximales (contraintes au bord de la plaque) d'une façon significative. Ces résultats démontrent que, quel que soit le cas de renforcement (carbodor, tissu...etc.) y compris le cas où le renforcement se limite à la zone centrale où le moment de flexion est maximum, il est recommandé de prolonger la plaque de renforcement le plus possible aux appuis.

IV.3.Effet du module de Young « E_a »

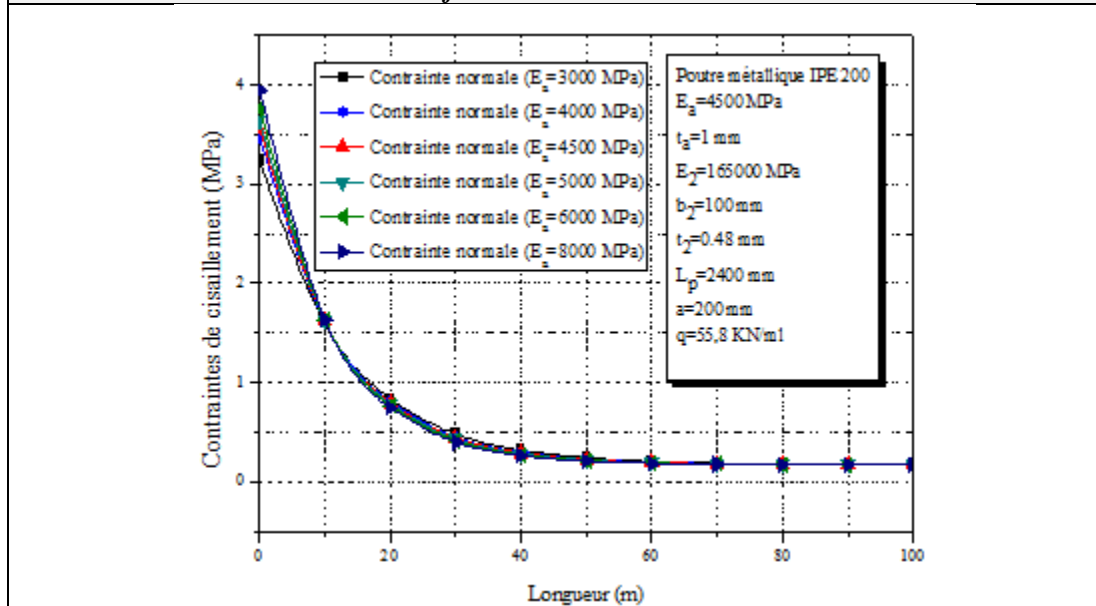




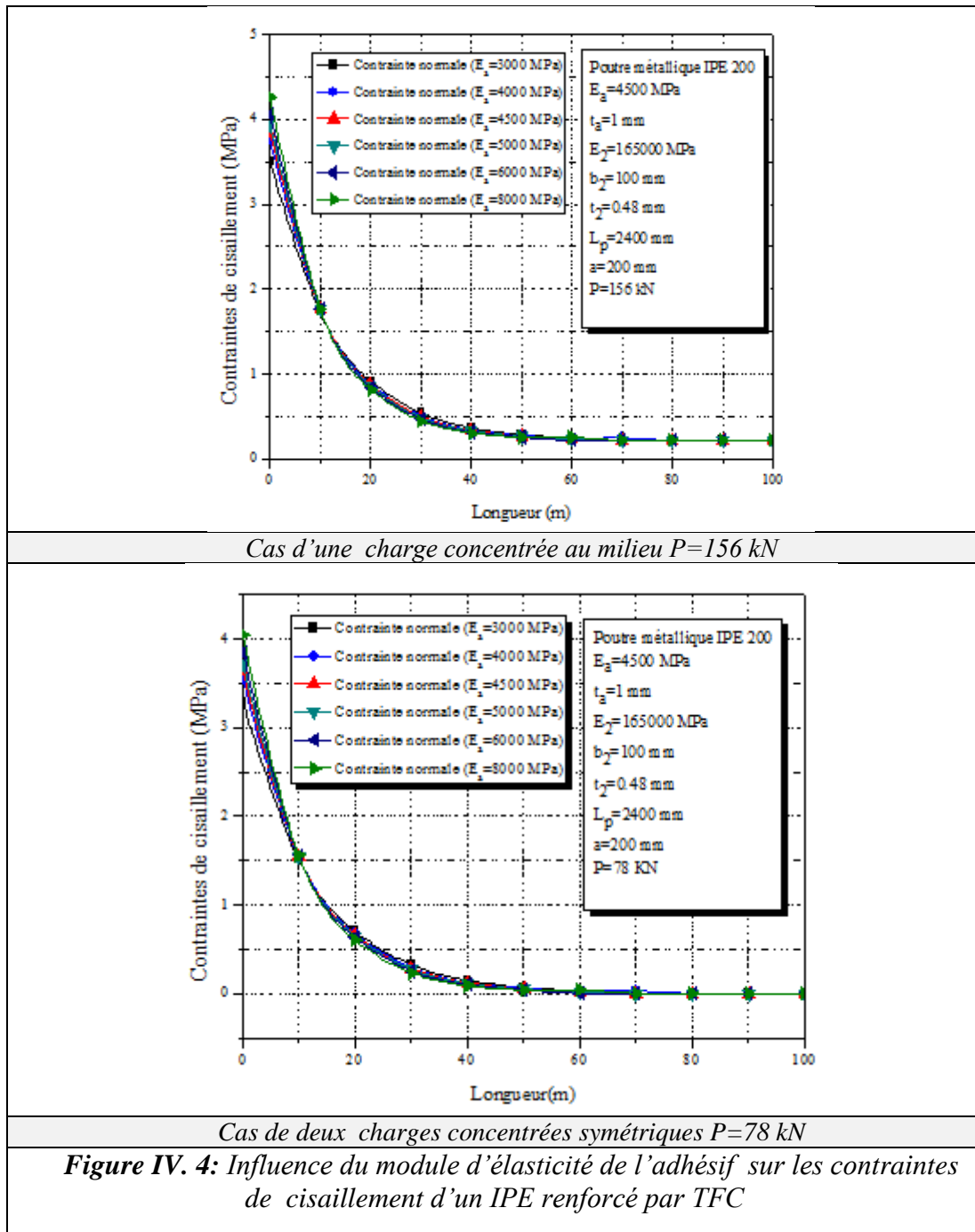
Cas de deux charges concentrées symétriques $P=78$ kN

Figure IV. 3: Influence du module d'élasticité de l'adhésif sur les contraintes de cisaillement d'un IPE renforcé par Cabodur

Renforcement tissu « TFC »

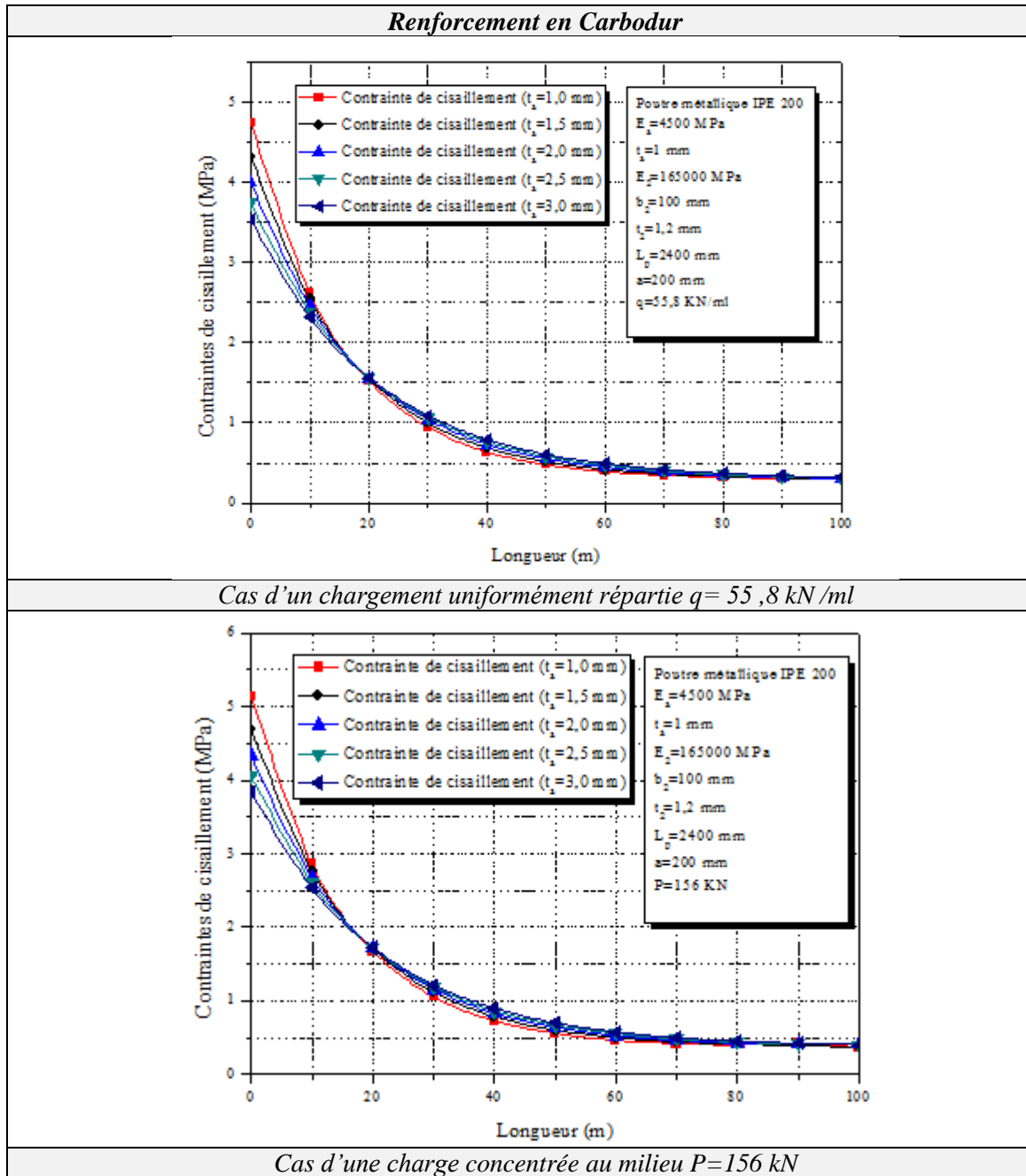


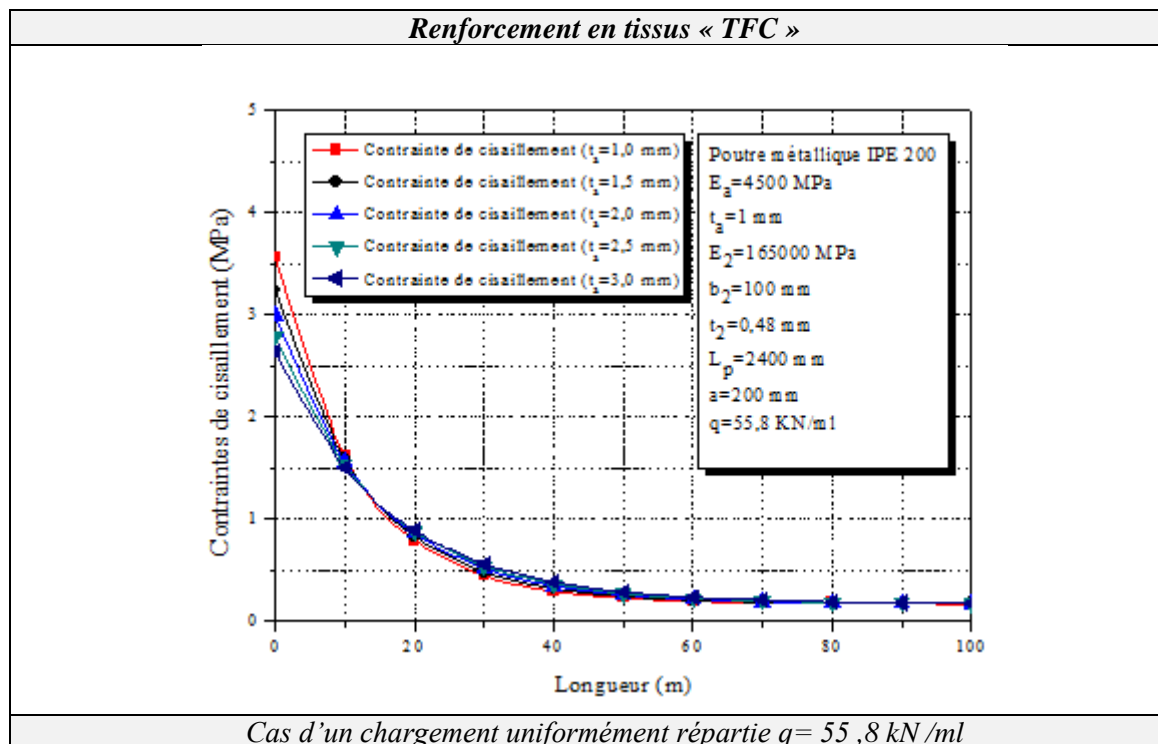
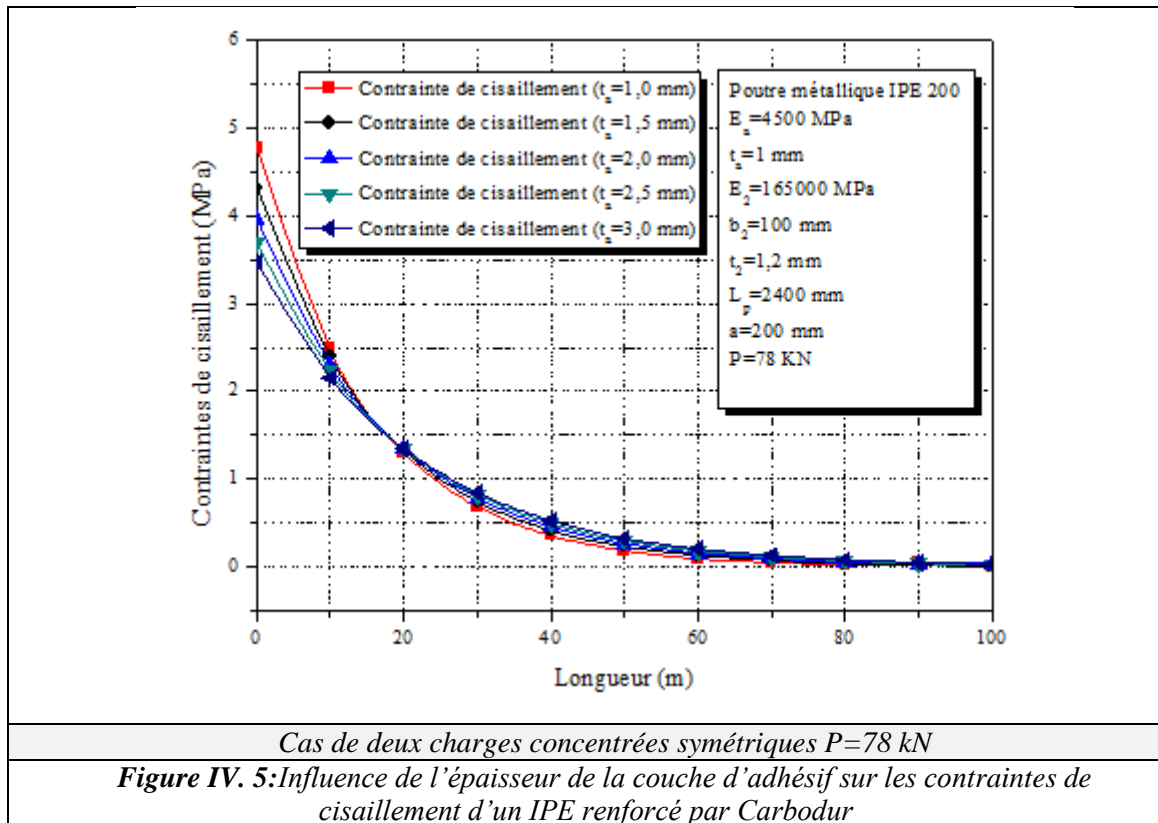
Cas d'un chargement uniformément réparti $q=55,8$ kN/m

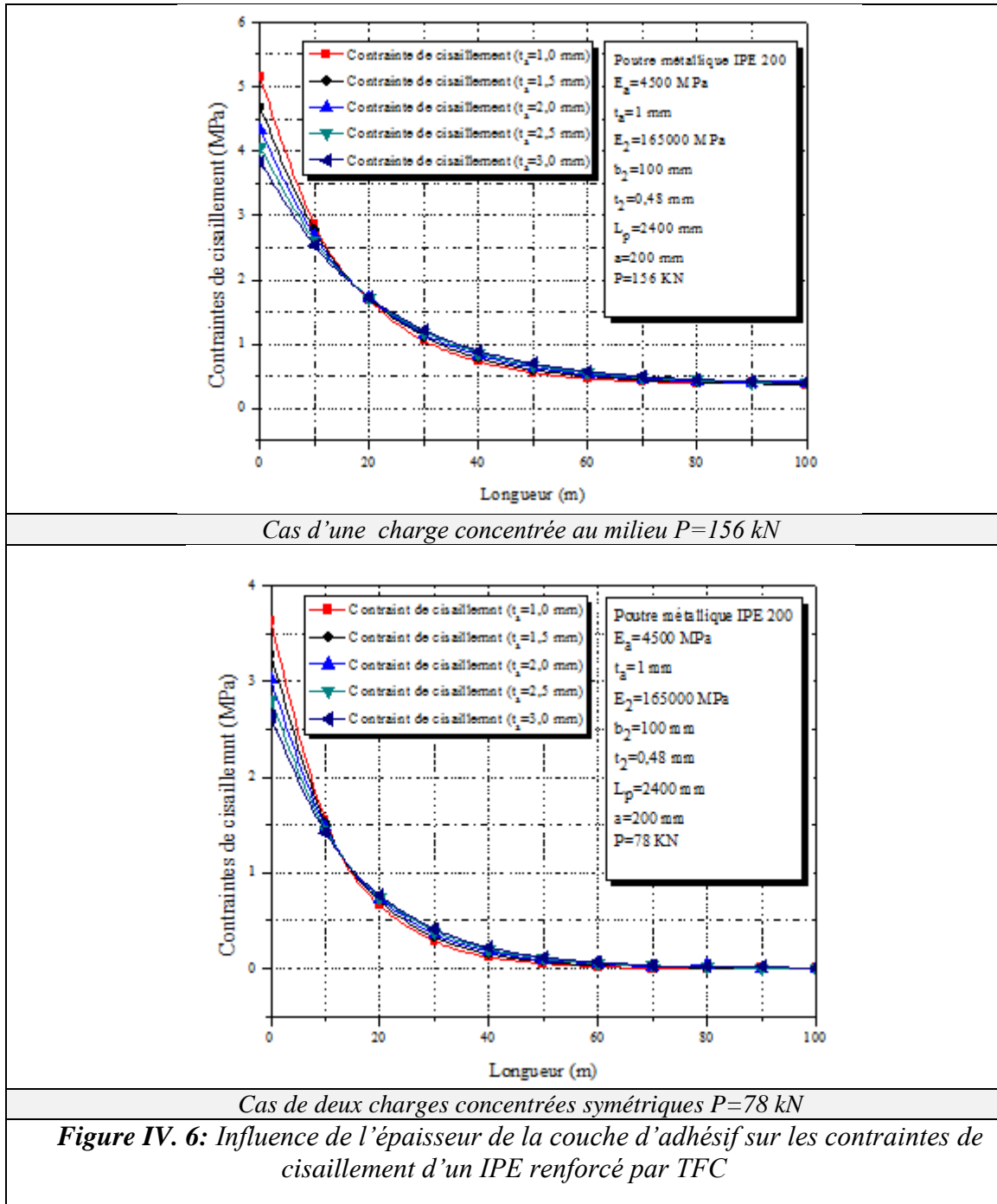


Les figures ci-dessus (IV.3 et IV.4) représente les contraintes de cisaillement qui ont une allure du module d'élasticité de la couche d'adhésif correspondant à $\nu_a=0,3$, croissante avec l'accroissement du module d' Young de la couche d'adhésif « E_a », quel que soit le type de renforcement.

IV.4.Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésif (t_a)

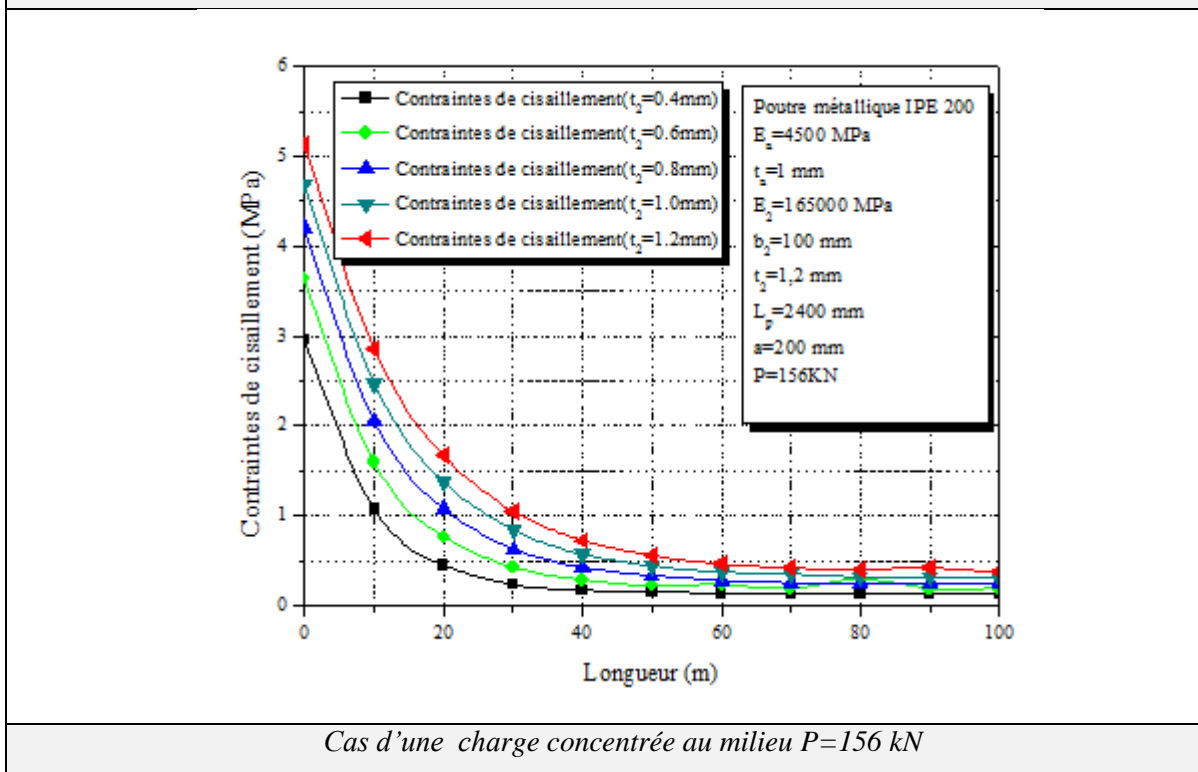
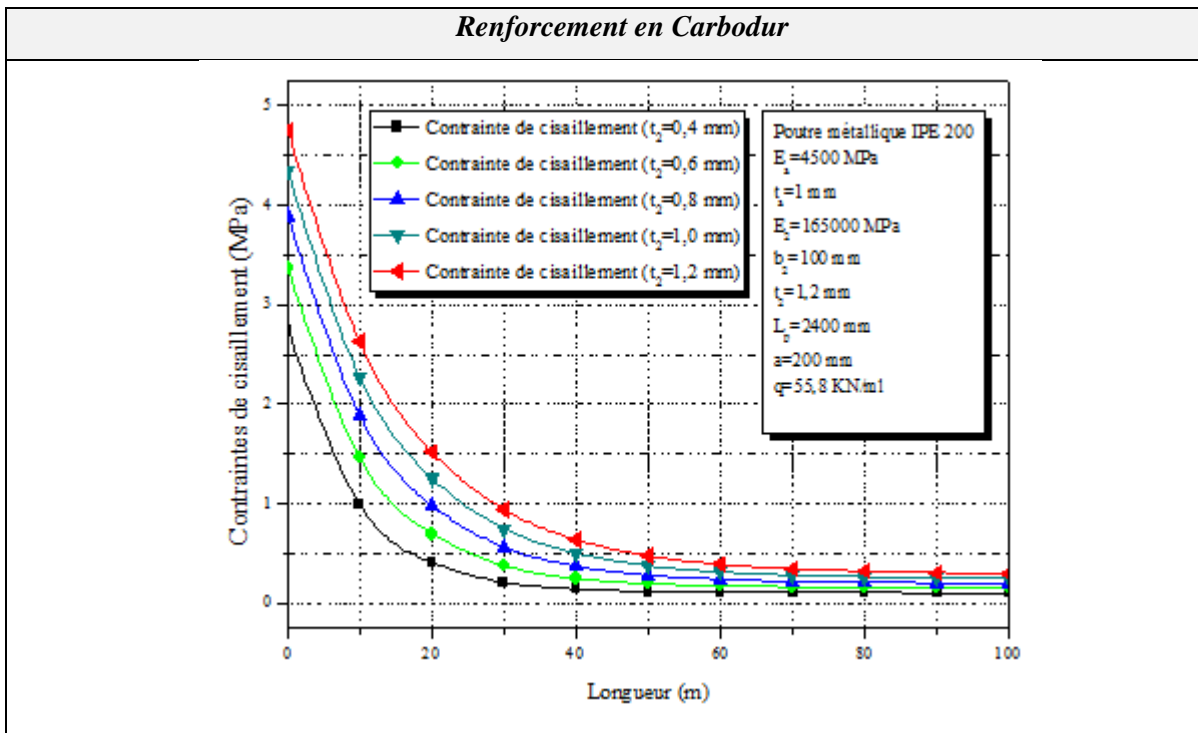


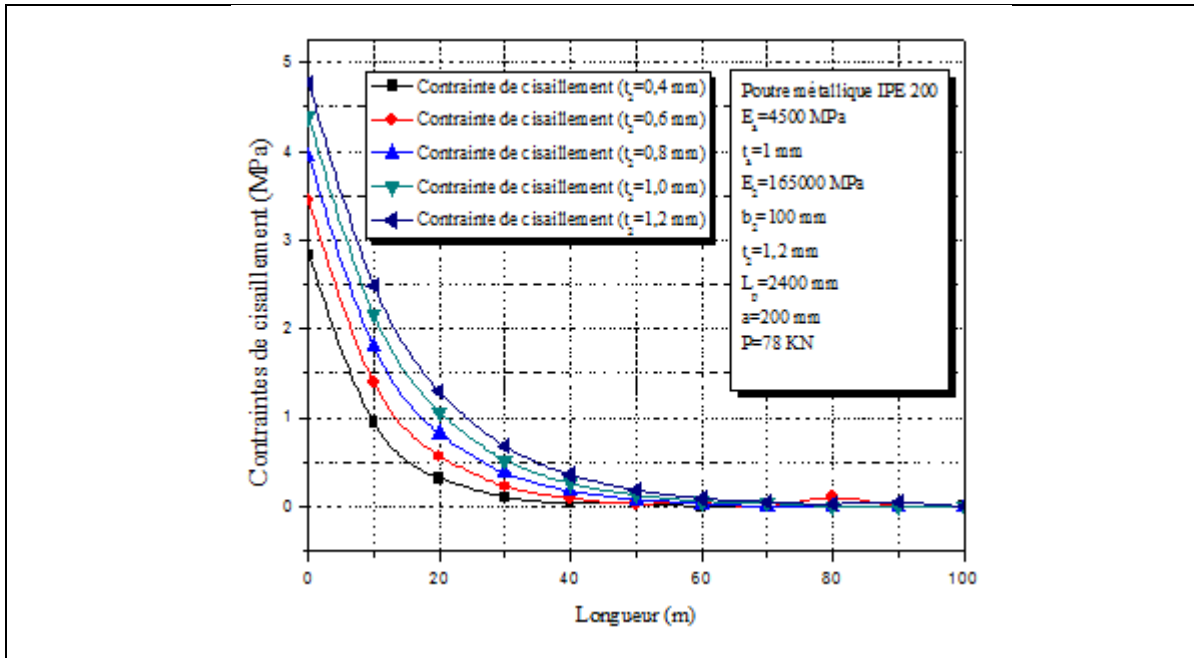




L'effet de l'épaisseur de la couche d'adhésif sur la variation des contraintes d'interface est représenté sur les figures (IV.5 et IV.6). L'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésif mène à une réduction significative des contraintes d'interface maximales. Ainsi, l'utilisation d'une couche d'adhésif plus épaisse, particulièrement aux voisinages des bords, est fortement recommandée (Le maximum des contraintes de cisaillement diminue à mesure que l'épaisseur de l'adhésif augmente ou l'épaisseur (nombre de plis) de la plaque de composite diminue).

IV.5.Effet de l'épaisseur du composite « t₂ »

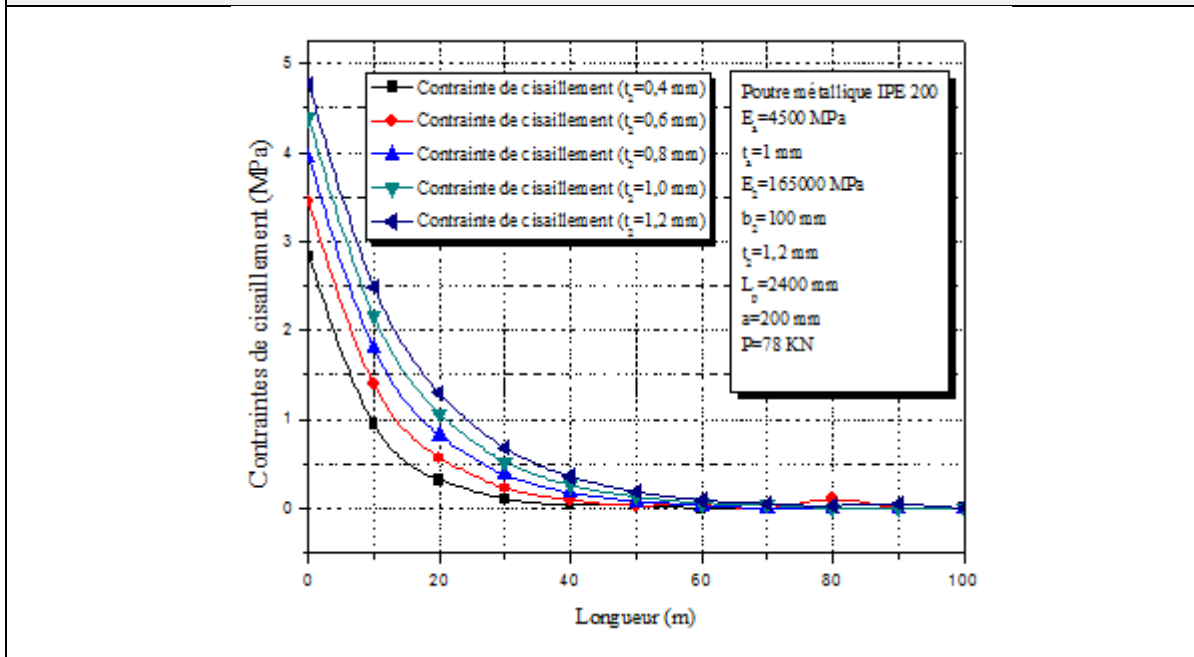




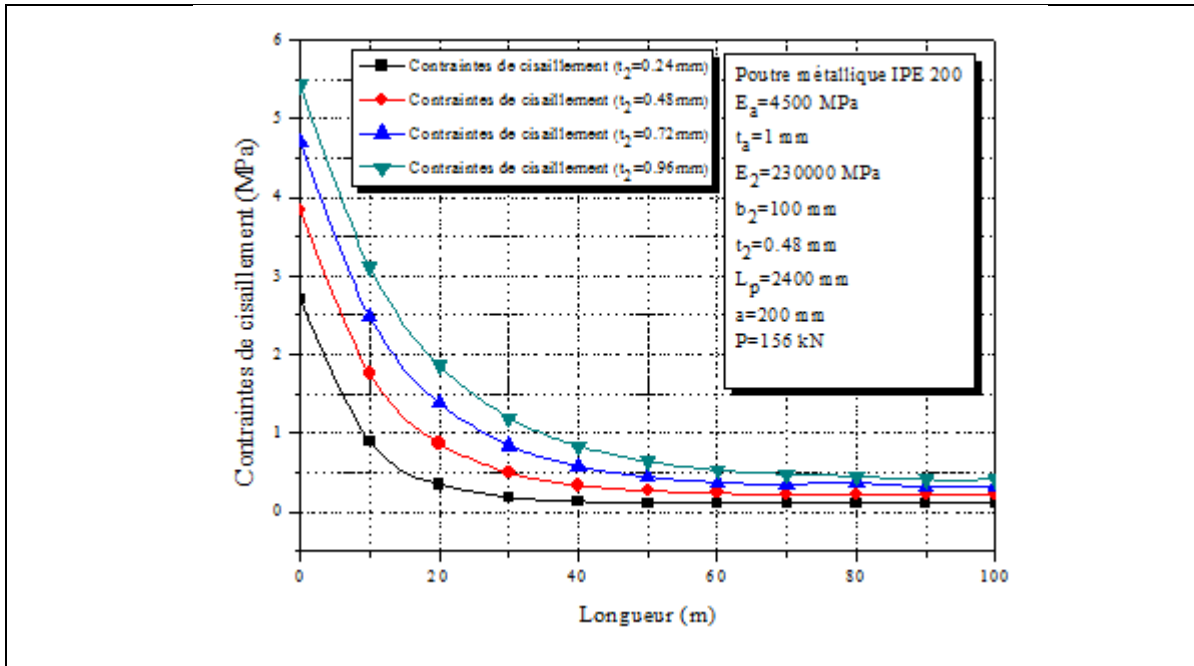
Cas de deux charges concentrées symétriques $P=78$ kN

Figure IV. 7: Influence de l'épaisseur du composite sur les contraintes de cisaillement d'un IPE renforcé par Carbodur

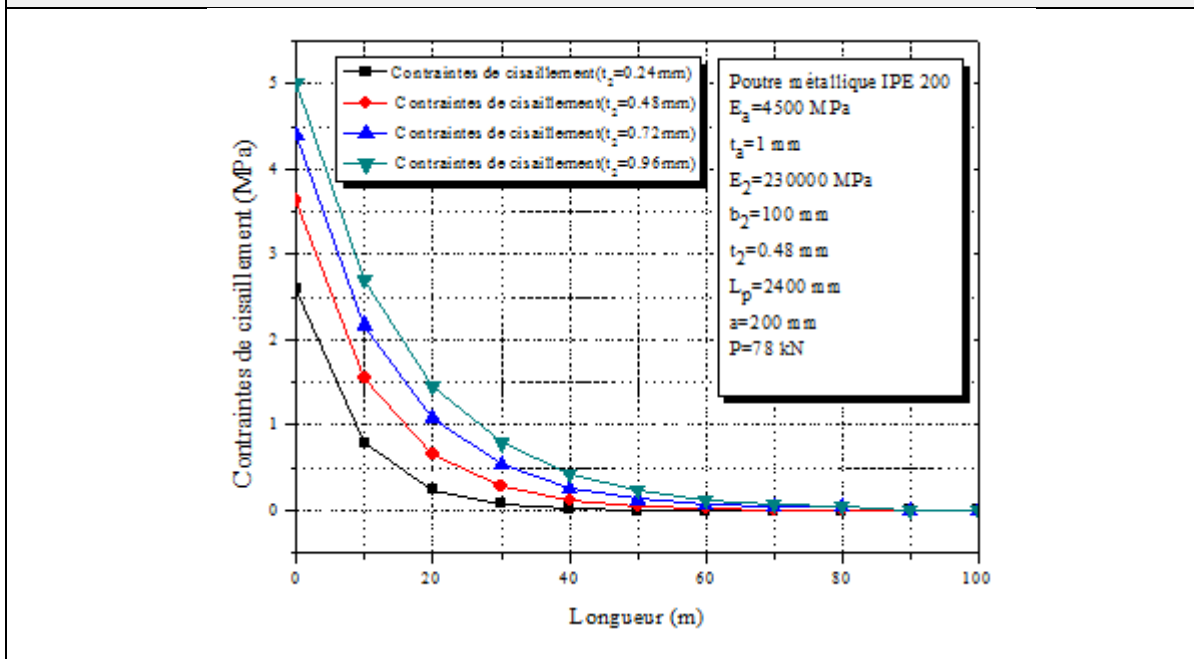
Renforcement tissu « TFC »



Cas d'un chargement uniformément répartie $q=55,8$ kN/ml



Cas d'une charge concentrée au milieu $P=156$ kN



Cas de deux charges concentrées symétriques $P=78$ kN

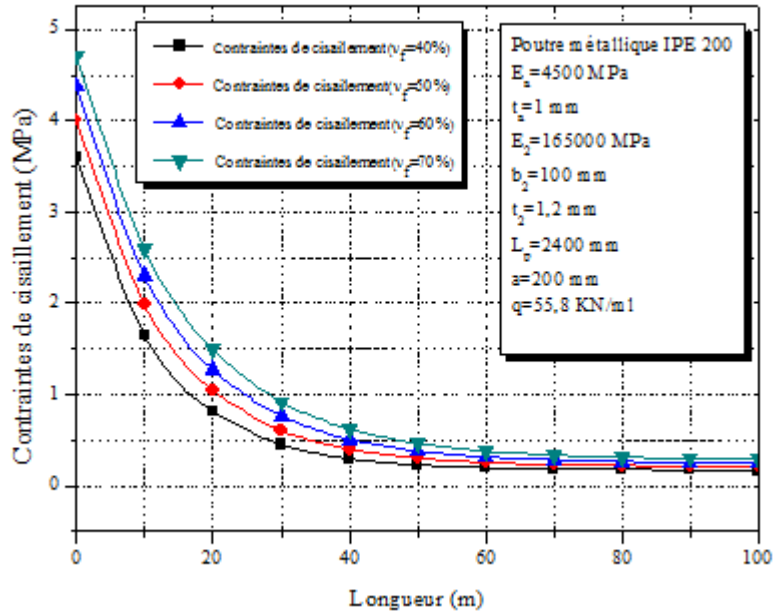
Figure IV. 8: Influence de l'épaisseur du composite sur les contraintes de cisaillement d'un IPE renforcé par TFC

Les figures (IV.7 et IV.8) Représentent l'effet de l'épaisseur du composite sur les contraintes de cisaillement, on remarque que lorsque en augment cette épaisseur les contraintes d'interface augmentent. au fur et à mesure que le maximum des contraintes de cisaillement augmente à mesure que l'épaisseur du composite augmente ou l'épaisseur (nombre de plis) de la plaque de composite diminue.

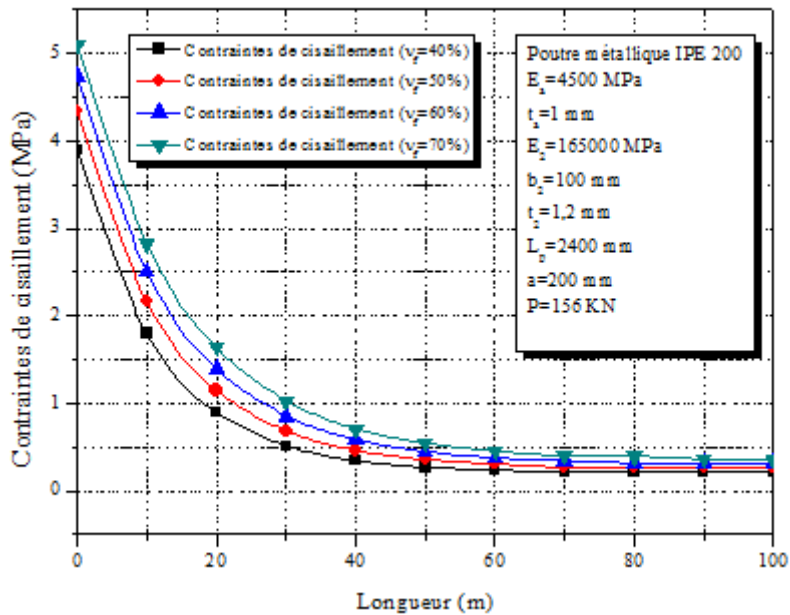
IV.6. Effet de la fraction volumique des fibres « v_f »

Renforcement en Carbodur

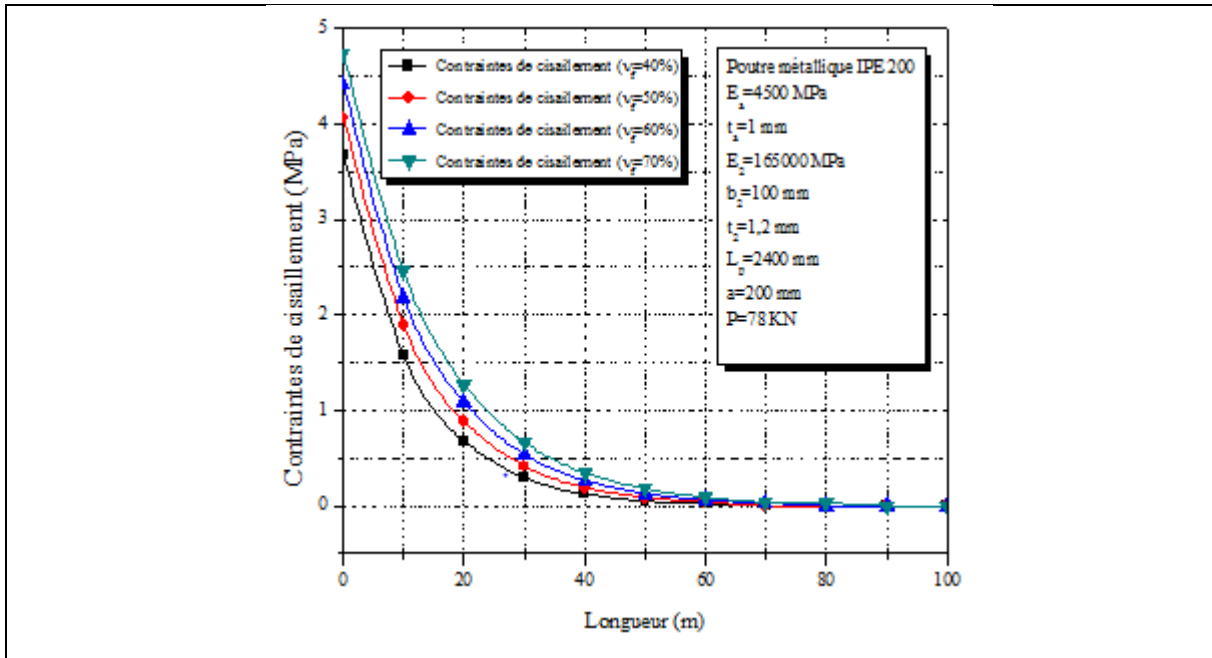
Contraintes de cisaillement



Cas d'un chargement uniformément répartie $q= 55,8$ kN/ml



Cas d'une charge concentrée au milieu $P=156$ kN

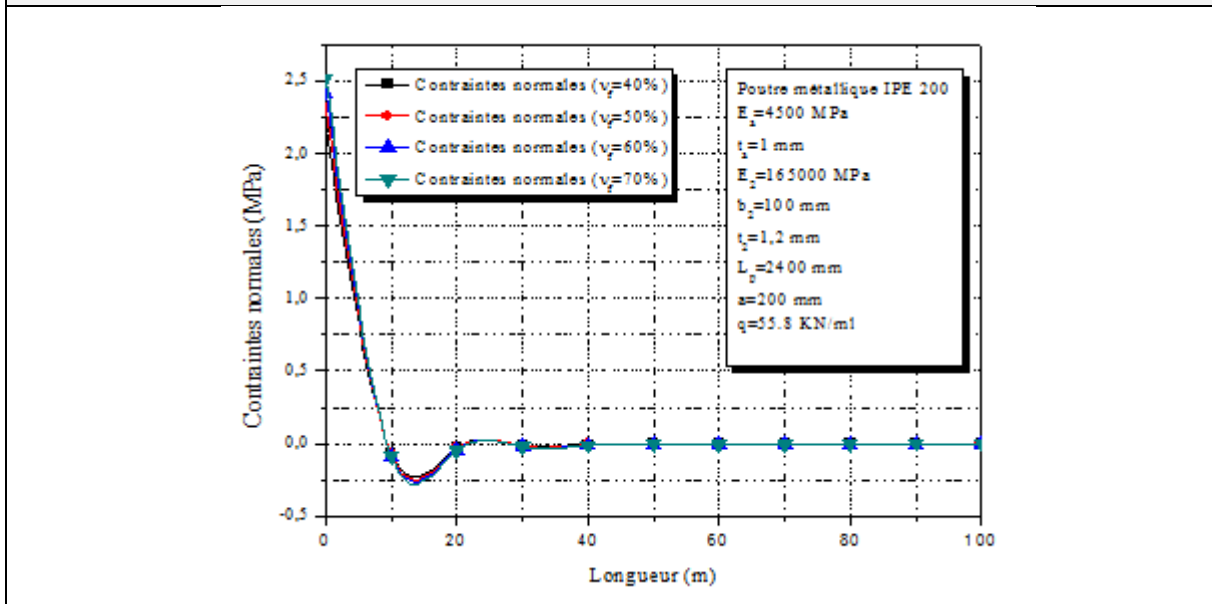


Cas de deux charges concentrées symétriques $P=78 \text{ kN}$

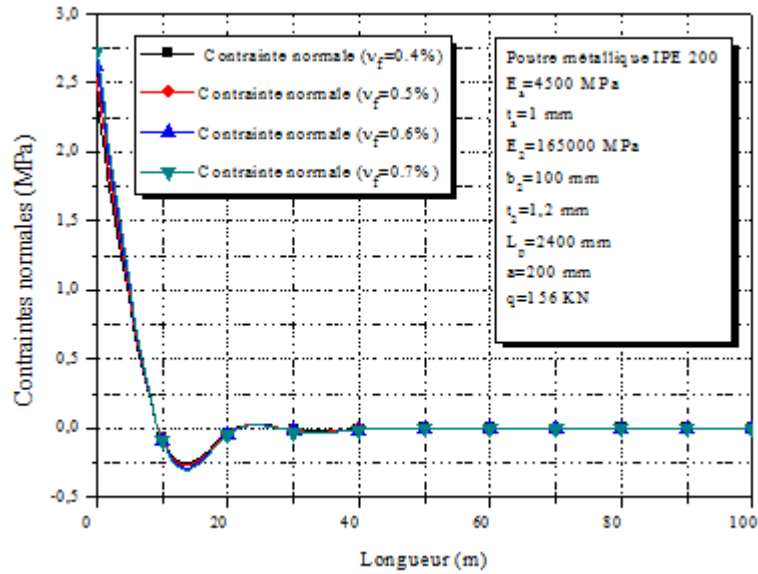
Figure IV. 9: Influence de la fraction des fibres sur les contraintes de cisaillement d'un IPE renforcé par Carبودur

Renforcement en TFC

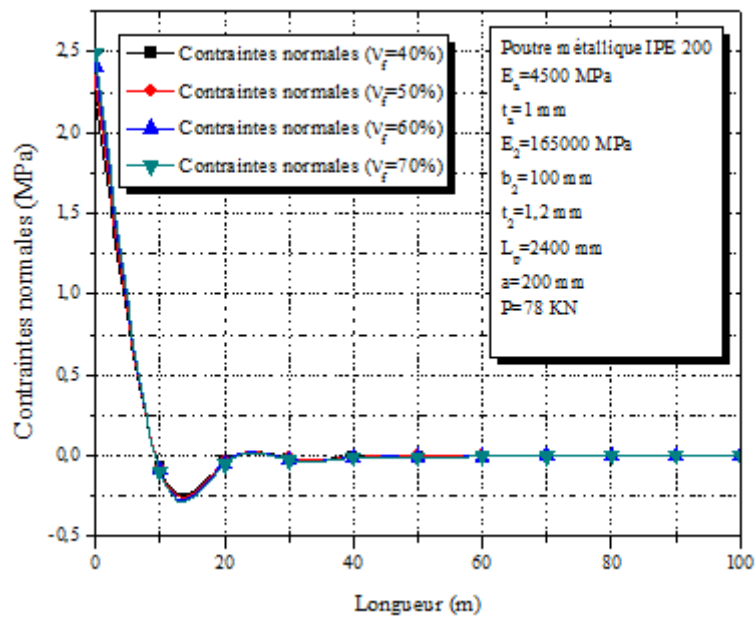
Contraintes normales



Cas d'un chargement uniformément répartie $q= 55,8 \text{ kN /ml}$



Cas d'une charge concentrée au milieu $P=156 \text{ kN}$



Cas de deux charges concentrées symétriques $P=78 \text{ kN}$

Figure IV. 10: Influence de la fraction des fibres sur les contraintes normale d'un IPE renforcé par TFC

Les figures ((IV.9 et IV.10) illustrent la variation des contraintes d'interface en fonction de la fraction volumique des fibres ($V_f=40\%$ 50% 60% et 70%). Ces dernières nous ont permis de montrer le lien tangible entre la fraction volumique des fibres V_f et l'évolution des contraintes d'interface.

IV.7. Conclusion

Dans la présente étude, une nouvelle analyse théorique des contraintes d'interfaces a été présentée. Cette étude paramétrique nous a permis de tirer les conclusions suivantes

- Le maximum des contraintes normales et de cisaillement diminue à mesure que l'épaisseur de l'adhésif augmente.
- Prolonger le plus possible la longueur de la plaque de renforcement aux appuis, réduit les contraintes aux bords.
- Les déformations de flexion et de cisaillement de la plaque de renforcement n'ont qu'un très léger effet sur les valeurs finales des contraintes normales et de cisaillement d'interface.
- Le maximum des contraintes d'interface (pic) est observé au bord de la plaque puis diminue, brusquement dans le cas des contraintes normales et progressivement pour les contraintes de cisaillement, pour atteindre toutes les deux la valeur zéro à mi-travée

Conclusion générale

L'objet de la présente recherche été le renforcement des ouvrages d'art par collage de matériaux composite. Cette recherche vient de confirmer et de compléter certains points précédemment menés sur le sujet de réhabilitation des ouvrages, après une analyse et modélisation des contraintes d'interface des poutres métallique renforcées en flexion par des plaques en matériaux composites.

Les matériaux composites présentent des avantages qui justifient pleinement leur utilisation pour la réhabilitation des ouvrages du génie civil. De plus, la grande expérience dans le domaine du collage structural dont bénéficient les acteurs de la réparation par plats métalliques colées doit permettre d'utiliser les matériaux composites avec d'autant plus de facilité. Le collage de plaque de matériaux composites sur les surfaces tendues est un moyen très efficace pour renforcer des structures en acier. La présence de matériaux composites sur les surfaces tendues améliore considérablement la résistance ultime et la raideur structurale de poutres renforcées.

Parmi les méthodes utilisées pour la détermination des contraintes d'interface, la méthode Benachour pour les poutres métalliques qui est basée sur la compatibilité des déformations, et qui a proposé une nouvelle solution théorique pour la détermination des contraintes d'interface dans une poutre métallique renforcée par une plaque de composite en prenant en compte les déformations de deux adhérents (acier-composite) dues aux cisaillements. Dans cette présente étude, nous avons présenté, en tant qu'autre développement de la méthode de Benachour, une solution analytique directe qui détermine les contraintes d'interface au niveau de la couche d'adhésif d'une poutre métallique renforcée par plaque en matériaux composite. Les conclusions tirées de la présente recherche sont les suivantes :

- Le maximum des contraintes d'interface est observé au bord de la plaque puis diminue,
- brusquement dans le cas des contraintes normales et progressivement pour les contraintes de cisaillement, pour atteindre toutes les deux la valeur zéro à mi travée.
- Les contraintes tangentielles d'interface sont réduites avec des diminutions de fraction de volume de fibre. Cependant, on n'observe presque aucun effet sur la variation des

contraintes normales d'interface. Cependant, on n'observe presque aucun effet sur la variation des contraintes normales d'interface.

- Prolonger le plus possible la longueur de la plaque de renforcement aux appuis, réduit les contraintes aux bords.
- Les déformations de flexion et de cisaillement de la plaque de renforcement n'ont qu'un très léger effet sur les valeurs finales des contraintes normales et de cisaillement d'interface.
- renforcées par composite en tenant compte la non linéarité du comportement.
- Améliorer la connaissance concernant la fiabilité et la durabilité des structures renforcées par composites (fatigue, fluage, ...).
- Améliorer la connaissance des structures métallique renforcées par composites en précontrainte.
- Les contraintes d'interface sont influencées par les paramètres géométriques tels que l'épaisseur de la couche d'adhésif on constate que l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésif mène à une réduction significative des contraintes d'interface maximales.

Enfin, les maîtres d'ouvrages désirent que la réparation ou le renforcement d'un pont existant par collage de composites soit effectué sous trafic, afin de n'être pas obligé d'interrompre la circulation et éviter ainsi une gêne aux usagers : le bon comportement en fatigue de poutres en renforcées par collage des plaques en composite sous chargement reste encore à démontrer. Des études complémentaires devraient être réalisées pour améliorer :

- la connaissance concernant la conception, le calcul et la validation du renforcement par composites,
- la connaissance concernant la fiabilité et la durabilité des structures renforcées par composites.
- la connaissance des structures réparées et renforcées par matériaux composites soumis à des sollicitations accidentelles ou extrêmes.

Références bibliographiques

- Adim B,(2016) "Etude de la stabilité des plaques en matériaux composites :analyse et modélisation " thèse de doctorat université de Tiaret.
- Anjami M., (2013) "Analyse du comportement mécanique des poutres métalliques renforcées par collage externe des plaques composites" mémoire de master université de Tiaret.
- Badour S., Hassaine Daouadji. T., Rabahi A., Belblidia M., (2018) "Utilisation des matériaux composites dans le renforcement des voiles en béton armé", 1st International Conference on Vulnerability and Rehabilitation of Structures, USTHB Alger.
- Belblidia. M, Hassaine Daouadji. T., Rabahi A., Badour S., Abbas B., "Analyse des contraintes d'interface dans les poutres métallique renforcées par collage externe des matériaux composites", (2018). 1st International Conference on Vulnerability and Rehabilitation of Structures, USTHB Alger.
- Berreur, L., De Maillard, B., et Nösperger, S. (2002) "L'industrie française des matériaux composites", Etude stratégique réalisée par Nodal Consultants pour le compte de la DiGITIP / SIM, Rapport final, Révision 2 du 13 mai 2002.
- Berthelot J. M., (1999) "Matériaux Composites-comportement mécanique et analyse des structures", 3^{eme} édition, pp5-30, p642.
- Breumen, U., (1989)"*Amélioration du comportement à la fatigue d'assemblages soudés : étude et modélisation de l'effet des contraintes résiduelles*", EPFL, Lausanne, (Thèse n° 787).
- Calgaro, J.A. et Lacroix, R., (1997) "Maintenance et réparation des ponts", *Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)*, 666 p.
- CNR - DT 202., (2007) *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.
- 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).

- Ferrier E.,(1999)"*Comportement de l'interface composite-béton sous des sollicitations de fluage thermostimulé et en fatigue oligocyclique. Application au calcul prévisionnel de la durabilité de poutre BA renforcées*". Thèse de doctorat, Université Lyon 1.
- Ferrier E., (1999) "*Comportement de l'interface composite-béton sous des sollicitations de fluage thermostimulé et en fatigue oligocyclique. Application au calcul prévisionnel de la durabilité de poutre BA renforcées*".Thèse de doctorat, Université Lyon 1.
- Godart B., (1997) "*La réparation du béton dégradé, Maintenance et réparation des ponts*". Chapitre 6, Presse de l'école Nationale des Ponts et Chaussées.
- Hamelin, P. (2002) "Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites", AM 5 615, *Technique de l'ingénieur, Traité Plastiques et Composites*, Vol. AM 6.
- Hassaine Daouadji T, Ait Amer M, Tounsi A, Adda Badia E A., (2009) 1er symposium méditerranéen de geoingeneering SMGE 09, "Réparation des ouvrages en béton armé par collage des plaques en matériaux composites", faculté de génie civil, université des sciences et technologie USTHB Alger, Algérie.
- Llanoos J., (1997) "*La maintenance des ponts routiers, Approche économique*" Presse de l'école Nationale des Ponts et Chaussées.
- Luyckx, J. (1999) "Composites à fibres de carbone dans le génie civil", *Technique de l'ingénieur, Traité Plastiques et Composites*, AM 5 620.
- Mufti, A.A., Erki, M.A. and Jaeger, L.G., (1991) "*Advanced Composite Materials with*
- Poyodi T., (2014) "Analyse et modélisation de l'efficacité de l'utilisation des matériaux composites pour le renforcement des structures métalliques" mémoire de master université de Tiaret.
- Rabahi A., Hassaine Daouadji. T., Abbes B., Belkacem A., (2016) "Analytical and solution of the interfacial stress in reinforced-concrete beams reinforced with bonded prestressed composite plate".
- Smith S.T. and Teng J.G., (2001) "Interfacial stresses in plated RC beams". *Engineering Structures*, 23(7), 857 – 871.

Vénuat M.,(1989)"*La pratique des ciments mortier et béton*". Moniteur technique, édition du moniteur.

Yahiaoui S., (2006) "Etude expérimentale de la durabilité des éléments en béton armé rigidifiés par les matériaux composites "mémoire de magister université de Boumerdes.

ZhelyazovT., (2008) "Renforcement des structures en béton arme par collage de matériaux composites" Thèse en cotutelle de doctorat Université de Reims.