



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

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

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Présenté par :

BENHADDOU Hanane

SAKET Okba

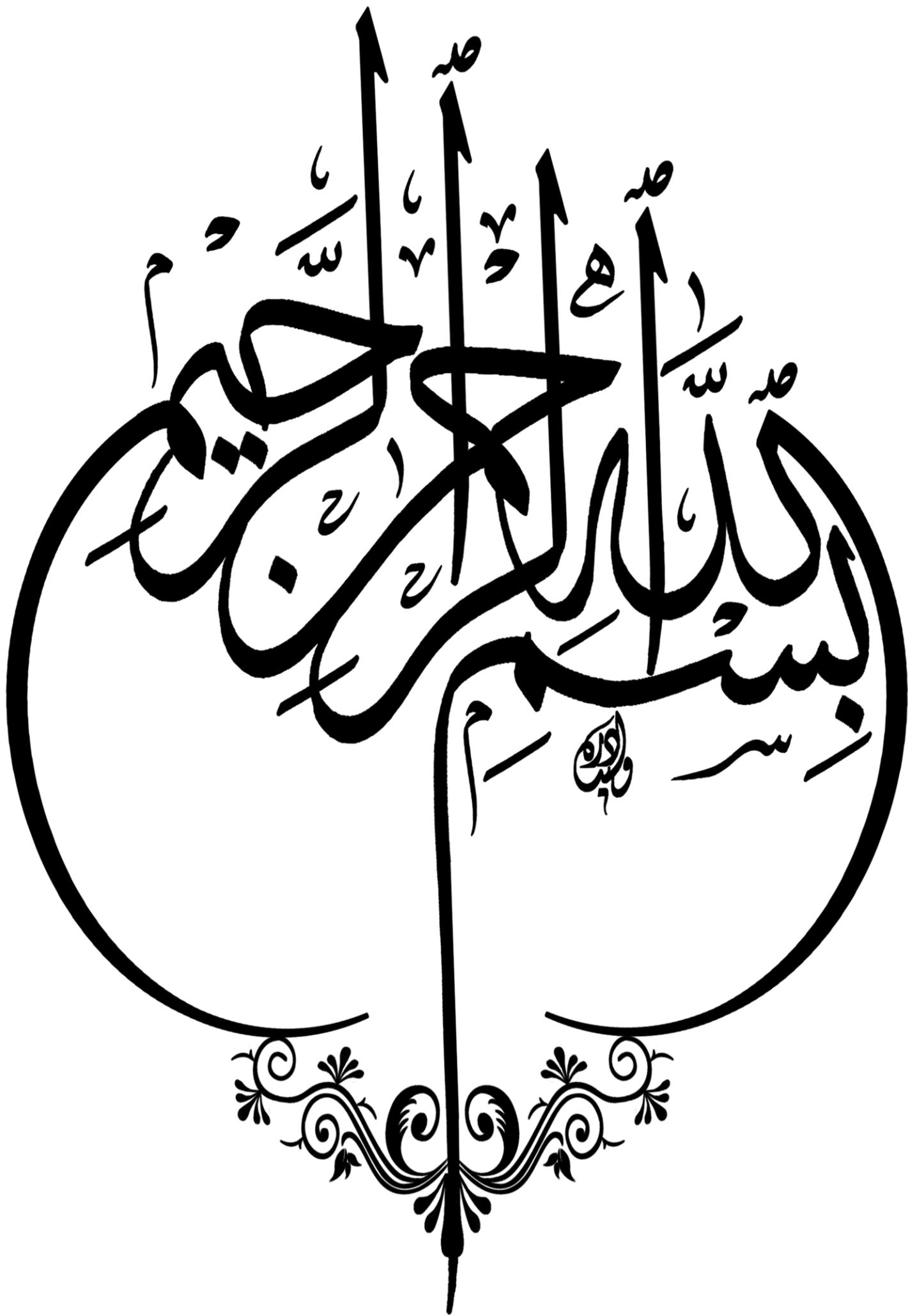
Sujet du mémoire

**Analyse du comportement des poutres continues en
béton armé renforcées en flexion par collage externe des
plaques en composites**

Soutenu publiquement le 05 /10/2020 Devant le jury composé de :

Dr.	Bensattalah Tayeb	Président
Prof.	Hassaine Daouadji Tahar	Rapporteur
Prof.	Zidour Mohamed	Examineur
Dr.	Saoula Abdelkader	Examineur

Promotion : 2019 /2020





Remerciements

Après avoir rendu grâce a Dieu le tout puissant et le miséricordieux nous tenons à remercier vivement tous ceux qui, de près ou de loin ont participé à la rédaction de ce document.

*Nous tenons à remercier dignement, profondément et sincèrement notre promoteur **Prof.Tahar Hassaine Daouadji** pour son aide, sa patience, sa compétence et ses précieux conseils et grâce à son appui on a achevé **Mr. Khaled Bouakez** et **Mr .Rabahi Abdrazak** et **Mr.Hadj Henni** qui nous aide par ses conseils.*

Nous tenons adresser nos sincères remerciements à tous les enseignants qui ont participé à notre document.

J e remercie tous les gens qui ont contribué de près ou loin dans ce Modest travail

En fin toute nos gratitude aux membres du jury qui nous font l'honneur de juger ce travail



Dédicace

*Je dédie en premier lieu cette modeste recherche à mes pères
Mohamed et lakhder et mes mères khadidja et kheira et mes frères
Baghdad et Adel et Salah ,à mes sœurs Chahra,Lobna,Sonia
,Racha,Mona,faten.*

*Je le dédie aussi à mes amis
Abdlbaki,Sofiane,Ahmed,Zineb,Houria,Chaima,Feyrouz,Aicha,*

A ma tante Maimona

A tous mes familles et mes cousines

Sommaire :

Sommaire.....	I
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VII
Liste des notations	IX
Résumé	XI
Abstract.....	XII
ملخص	XIII
Introduction générale	1

CHAPITRE I

Pathologie et techniques de réhabilitation des structures en béton armé

I.1.Introduction	4
I.2.Dégradation par fissuration des ouvrages en béton armé	5
I.2.1.Introduction.....	5
I.2.2.L'un des principaux symptômes de la dégradation du béton : la fissuration.....	5
I.2.2.1.La fissuration normale du béton armé.....	5
I. 2. 2. 2. Quelques origines possibles des fissures	6
I.2.2.3.Caractéristiques des fissures	6
I.2.2.4.Rôle mécanique de la fissure	7
I.2.3.Corrosion des armatures	8
I.2.3.1. Carbonatation et corrosion des aciers	8
I.2.3.2.Conséquences de la corrosion	9
I. 2. 4. Agressivité du milieu extérieur	10
I. 2. 5. Retrait et tassement du béton ; la fissuration précontrainte.....	11
I. 2. 6. Erreurs de conception – défauts d'exécution.....	11

I. 2. 7. Fissuration accidentelles.....	12
I. 3. Méthodes de réparation et renforcement des ouvrages en béton armé.....	13
I. 3. 1. Introduction	13
I.3.2.Méthodes de réparation non structurales pour les ouvrages en béton armé	14
I. 3. 2. 1. Préparation de la surface de béton	14
I. 3. 2. 2. Protection des aciers	15
I. 3. 2. 3. Réparation du béton dégradé par apports de matériaux	15
I. 3. 3. Méthodes de réparation structurales	15
I. 3. 3. 1. Adjonction d'armature complémentaire	16
I. 3. 3. 2. Béton projeté.....	16
I. 3. 3. 3. Précontrainte additionnelle.....	18
I.3.4.Réparation et renforcement à l'aide des tôles métalliques collées	19
I.3.5.Réparation et renforcement par collage des matériaux composites.....	20
I.3.5.1.Utilisation des composites dans le génie civil.....	20
I.3.5.2.Remplacement des tôles métalliques par des matériaux composites à fibres de carbone.....	21
I.3.5.3.Application des matériaux composites pour la réparation et le renforcement des ouvrages en béton armé.....	22
I. 4. Conclusion.....	24

CHAPITRE II

Généralités sur les matériaux composites

II.1.1.Introduction	26
II.1.2.Définition d'un matériau composite.....	26
II. 1. 3. Revue différents renforts disponibles.....	27
II. 1. 3. 1. Les fibres de carbone	27
II. 1. 3. 2. Les fibres de Kevlar	27

II. 1. 3. 3. Les fibres de Verre	28
II. 1. 4. Notion sur les matrices.....	28
II. 1. 4. 1. Les matrices organiques	28
II. 1. 4. 2. Résines thermodurcissables	29
II. 1. 4. 3. Résines thermoplastiques	29
II. 1. 4. 4. Les matrices métalliques.....	29
II.1.5.Problèmesliés à l'utilisation des matériaux composites dans le génie civil	30
II. 1. 5. 1.Introduction	30
II. 1. 5. 2. Résistance des matériaux composites.....	30
II. 1. 5. 3. Elasticité à différentes échelles	31
II. 1. 5. 4. Adhésif.....	33
II . 2. Présentation de la théorie des plaques stratifiées.....	34
II. 2. 1. Notation	35
II. 2. 2. Hypothèses de la théorie des stratifiés.....	36
II. 2. 3. Relation déformation – déplacement	37
II. 2. 4. Les contraintes	38
II. 2. 5. Les Forces par unité de longueur.....	39
II. 2. 6. Moments par unité de longueur.....	40
II. 2. 7. Relations constitutives du stratifié.....	41
II. 2. 8.Stratifiés symétriques	43
II. 3. Conclusion	45

Chapitre III

Modélisation des contraintes d'interface dans les poutres continues en béton armé

III.1. Introduction.....	47
--------------------------	----

III.2.Comportement mécanique d'une section de poutre en béton armé renforcé.....	47
III.3. Mécanisme de rupture sous chargement de flexion d'une poutre en béton armé renforcé par composite.....	50
III.4. Analyse des contraintes d'interface pour une poutre en béton armé renforcée par composite	53
III.4.1.Hypothèsede la présente méthode	53
III.4.2. Schéma statique de la poutre	54
III.4.2.1. Renforcement en travée.....	55
III.4.2.2. Renforcement en appui.....	61
III.5. Conclusion	67

Chapitre IV

IV. Présentation et interprétation des résultats

IV.1. Introduction	69
1.Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés.....	69
2.Schéma statique de la poutre renforcée.....	70
3. Vérification de la méthode	70
4. Etude paramétriques.....	71
4. 1. Effet de la rigidité de la plaque composite.....	71
4. 2. Effet de l'épaisseur de la plaque composite	74
4. 3.Effet de la longueur non renforcée "a" (distance de l'appui au bord de la plaque de renforceme.....	75
4. 4. Effet de l'épaisseur de la colle (couche d'adhésive).....	77
4. 5. Effet de l'orientation des fibres θ°	78
VI.3. Conclusion	80
Conclusion générale	83
Références bibliographique	86

Liste des figures

Figure I. 1. Carbonatation d'une pièce de structure	9
Figure I. 2. Corrosion des armatures.....	9
Figure I. 3. Fissurations dues à la corrosion.....	10
Figure I. 4. Réparation de poutre par adjonction d'armature.....	16
Figure I. 5. Réparation de poutre par béton projeté sans adjonction d'armatures complémentaires.....	17
Figure I. 6 Réparation de poutre par béton projeté avec adjonction d'armatures complémentaires.....	18
Figure. I.7. Différents types de réparation par précontrainte additionnelle	19
Figure I.8. Renforcement d'un viaduc par tôles collées	20
Figure I.9. Différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques en composites	22
Figure I. 10. Procédé de mise en œuvre de collage du tissu.....	23
Figure I. 11. Mise en œuvre d'une réparation par stratification.....	24
Figure II. 1 : relation contrainte déformation en traction pour les différents composants (Berthelot, 2002).....	30
Figure II. 2 : Illustration d'un renfort fibreux unidirectionnel.....	31
Figure II. 3 : Modes de rupture des matériaux composites Berthelot, 2002):	33
Figure II.4 : composite stratifié.....	34
Figure II.5: Les coordonnées d'un stratifié.....	35
Figure II. 6 : Plan médium dans un stratifié déformé.....	37
Figure II .7 : Forces par unité de longueur.....	39
Figure II.8 : Moments par unité de longueur	41
Figure II.9. Couches symétriques.....	44
Figure III.1. Les trois phases de comportement d'une poutre en béton armé fléchie renforcée par un stratifié composite.....	48

Figure III.3. Modes de rupture des poutres renforcées de matériaux composites.....	50
Figure III.2. comportement structural d'une poutre renforcée.....	49
Figure III.4. Différents modes de rupture des poutres en béton armé renforcées par composite(a) rupture du béton comprimé ; (b) rupture du composite ; (c) fissure de l'effort tranchant(d) décollement du composite à l'extrémité ; (e) rupture de l'enrobage du béton.....	51
Figure III.6. Poutre continue en béton armé renforcée par collage des plaques en composite.....	54
Figure III.7. Forces dans un élément infinitésimal d'une poutre continue en béton armé renforcée par collage des plaques en composite: renforcement en travée.....	55
Figure III.8. Forces dans un élément infinitésimal d'une poutre continue en béton armé renforcée par collage des plaques en composite: renforcement en appui.....	62
Figure IV .1. Caractéristique géométrique d'une poutre continue en béton armé renforcée par collage de matériau composite.....	70

Liste des tableaux

Tableau II. 1 : Propriétés des fibres de carbone (Berthelot, 2002).....	27
Tableau II. 2 : Propriétés des fibres de Kevlar (Berthelot, 2002)	28
Tableau II. 3 : Propriétés des fibres de Verre (Berthelot, 2002).....	28
Tableau II. 4 : Propriétés des Résines thermodurcissables (Berthelot, 2002).....	29
Tableau II. 5 : Caractéristiques typiques de l'adhésif d'époxy (FIB bulletin 14, 2001).....	34
Tableau II. 6 : Exemple des notations des stratifiés.....	36
Tableau IV.1 : Caractéristiques géométriques et propriétés mécaniques des matériaux.....	69
Tableau IV .2. Comparaison des contraintes d'interface pour une poutre continue en béton armé renforcée par collage externe d'une plaque en CFRP	71
Tableau IV .3. Effet de la rigidité de la plaque composite pour le renforcement en travée d'une poutre continue en béton armé.....	72
Tableau IV .4. Effet de la rigidité de la plaque composite pour le renforcement en appui d'une poutre continue en béton armé	73
Tableau IV .5. Effet de l'épaisseur de la plaque composite pour le renforcement en travée d'une poutre continue en béton armé.....	74
Tableau IV .6. Effet de l'épaisseur de la plaque composite pour le renforcement en appui d'une poutre continue en béton armé	75
Tableau IV .7. Effet de la longueur non renforcée pour le renforcement en travée d'une poutre continue en béton armé	76
Tableau IV .8. Effet de la longueur non renforcée pour le renforcement en appui d'une poutre continue en béton armé.	77
Tableau IV .9. Effet de l'épaisseur de la colle pour le renforcement en travée d'une poutre continue en béton armé	78
Tableau IV .10. Effet de l'épaisseur de la colle pour le renforcement en appui d'une poutre continue en béton armé	78
Tableau IV .11. Effet de l'orientation des fibres pour le renforcement en travée d'une poutre continue en béton armé	79

Liste des tableaux

Tableau IV .12. Effet de l'orientation des fibres pour le renforcement en appui d'une poutre continue en béton armé**80**

Notation

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

A_1 : Aire de la section en béton

[B] : Matrice de couplage flexion –membrane.

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

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

$[A'_{11}]$: Premier terme de la matrice [A']

B_1 et B_2 : Constantes d'intégration

b_2 : largeur de la plaque

b_1 : Largeur de la poutre en béton

[D] :matrice de flexion

[A] :matrice de membrane

[B] :matrice de couplage flexion-membrane

C_1 et C_2 constantes d'intégration

$E(i=1,2)$:module de YOUNG de la poutre et la plaque de composite

E_a :module de YOUNG de l'adhésif

G_a :module de cisaillement de la couche d'adhésif

Q_{ij} :matrice de rigidité

$G(i=1,2)$:module de cisaillement de l'adhérent i

I_1 :moment d'inertie du section en béton

I_2 :moment d'inertie du section en composite

K_s :rigidité tangentielle de l'adhésif

K_n =rigidité normale de l'adhésif par unité de longueur

L_t :longueur de la poutre

L_p :longueur de la plaque

$M(x)$:moment fléchissant

Liste des notations

M_t : Moment total appliqué

$N(i=1,2)$: les forces axiales du béton et de la plaque composite

q : charge répartie

$t(i=1,2)$: épaisseur de l'adhérent (i)

t_a : épaisseur de l'adhésif

$U_1^N(x,y)$: déplacement longitudinale dans la poutre renforcée

u_1 : déplacement longitudinale à la base de la poutre en béton

u_2 : déplacement longitudinale à la partie supérieure de la plaque

$V(x)$: effort tranchant

$V_1(x)$ et $V_2(x)$: effort tranchant appliqué dans la poutre en béton et composite

a : distance compté à partir du bord de la plaque composite

$w_i(i=1,2)$: déplacement vertical de l'adhérent i

σ_n : contrainte normale de l'adhésif

τ_a : contrainte de cisaillement

ε_1 : Déformation à la base de l'adhérent 1

ε_2 : Déformation à la base de l'adhérent 2

Résumé

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

Dans cette étude, nous présentons un développement analytique et une analyse pour calculer les contraintes d'interface dans une poutre continue en béton armé renforcée en flexion par collage des plaque en composite sous des charges mécaniques. Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux des méthodes connus dans la littérature, et une série d'études paramétriques a été réalisée.

Mots clés: Poutre en béton armé, renforcement, matériaux composites, contraintes d'interface.

Abstract

The use of carbon fiber reinforced polymers composites to upgrade structures and, in particular, to extend the lives of reinforced concrete structures has wide applications. One of the main aspects of the bonded strengthening technology is the stress analysis of the reinforced structure. In particular, reliable evaluation of the adhesive shear stress and of the stress in the CFRP plates is mandatory in order to predict the breaking load of reinforced concrete beams. In this study, we present an analytical development and analysis to calculate the interface stresses in a continuous reinforced concrete beam reinforced in bending by bonding the composite plates under mechanical loads. The results obtained were compared with those of methods known in the literature, and a series of parametric studies was carried out.

Keywords: Reinforced concrete beam, reinforcement, composite materials, Interfacial stresses.

ملخص

استخدام البوليميرات المقواة بالألياف الكربون المركبة لإعادة تأهيل أو تقوية الهياكل وعلى وجه الخصوص

لإطالة عمر الهياكل الخرسانية المسلحة. له تطبيقات مختلفة احد الجوانب الرئيسية لتقنية تعزيز الترابط هو تحليل إجهاد الهيكل المعزز.

علي وجه الخصوص يعد التقييم الموثوق به لضغط إلزاميا من اجل التنبؤ بحمل كسر عوارض الخرسانة المسلحة. القص اللاصق والضغط في ألواح في هذه الدراسة تقدم تطورا تحليليا لحساب ضغوط الواجهة في عارضة الخرسانة المسلحة المستمرة المقواة بالثني عن طريق ربط الالواح المركبة تحت تأثير الأعمال الميكانيكية. تمت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع تلك الخاصة بالطرق المعروفة في الأدبيات وإجراء سلسلة من الدراسات البارامترية

الكلمات المفتاحية: شعاع الخرسانة المسلحة. التسليح. المواد المركبة.

Introduction générale

Introduction générale

Les ouvrages ont une durée de vie après laquelle ils vieillissent et s'endommagent. Alors que le remplacement d'une structure est généralement une solution coûteuse, les techniques de réhabilitation (réparation ou renforcement) fournissent des solutions de rechange attrayantes à la construction. La réhabilitation peut prolonger la vie d'une structure; si un bâtiment ou un pont doivent être remplacés, les réparations provisoires peuvent prolonger la durée de vie d'une structure à l'état critique jusqu'à ce qu'un remplacement soit opérationnel. Le sujet de renforcement a fait l'objet d'une recherche extensive durant les dernières décennies, en raison de l'augmentation des dépenses de travaux de réhabilitation des ouvrages bâtis, l'organisation et la rationalisation des dépenses de l'entretien est devenu plus que nécessaire. A fin de permettre une planification et une réduction des dépenses, ces enjeux économique ont été à l'origine de la mise en place des plans de maintenance, qui vont du diagnostic au renforcement. Grace à leurs caractéristiques mécaniques et physico-chimiques, les matériaux composites se sont taillés une place importante en génie civil, de nos jours le collage en matériaux composites est l'une des méthodes de réparation et de renforcement les plus employées dans ce marché en pleine expansion .plusieurs éléments de structure peuvent être renforcés par collage externe des matériaux composites.

Diverses techniques de réhabilitation ont été développées, le béton projeté, la précontrainte additionnelle ou encore le collage de tôles d'acier se pratiquent déjà. Une autre solution (déjà en application) pour accroître la durabilité et les performances à long terme des infrastructures consiste à intégrer les matériaux composites lors de la construction. Plusieurs projets de démonstration touchant particulièrement les ponts et passerelles ont été réalisés à travers le monde. Notre présent travail a pour objectif, l'analyse des contraintes d'interfaces dans les poutres continues en béton armé renforcées par des matériaux composites collés extérieurement. Une étude paramétrique sera menée relativement au cas de charges impliquer ainsi qu'aux caractéristiques mécaniques et géométriques afin de quantifier l'influence du composite sur les éléments renforcés.

Le présente manuscrit de master est subdivisée en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur les dégradations par fissurations des ouvrages en béton armé et les différentes méthodes et les matériaux de

- réparation en recherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance dues à la fissuration. Ces techniques de réparation dites structurales et non structurales.
- Le deuxième chapitre sera consacré à une revue d'ensemble sur les matériaux composites, leurs différents propriétés, description de la théorie des stratifié (la stratification) et l'orientation puisque ces deux derniers paramètres ne doivent pas être négligés dans l'étude des contraintes d'interface.
- Le troisième chapitre portera sur le développement mathématique pour les calculs des contraintes d'interface dans les poutres continues en béton armé sous chargement mécanique renforcées par collage des plaques de matériaux composites.
- Le chapitre quatrième est consacré une présentation des résultats suivi d'une analyse.

En fin nous achevons notre travail par une conclusion générale construite les résultats obtenus avec notre méthode et permet de souligner son efficacité dans la conception et le calcul au renforcement des structures par matériaux composites.

Chapitre 1 :

Pathologie et techniques de réhabilitations des structures en béton armé

I. Pathologie et techniques de réhabilitations des structures en béton armé

I. 1. Introduction :

Depuis plus de cinquante ans, la construction neuve a représenté l'essentiel de l'activité du secteur du bâtiment et des travaux publics en Algérie et ce, pour des raisons diverses liées à la nécessité de construire des nouveaux logements, à l'amélioration des équipements publics, à la modernisation du parc industriel et à l'évolution des activités du tertiaire. La maintenance n'a été, pendant cette période, qu'une activité du second ordre, indispensable certes à la conservation du patrimoine et au fonctionnement des équipements techniques, mais délaissée au profit de la conception et de l'ingénierie de la construction. Aussi, de nombreux ouvrages d'arts ont été bâtis avec des prévisions de trafic routier qui se révèlent maintenant être inférieures au trafic actuel. Ce phénomène est maintenant pris en compte car les règlements du trafic routier proposent des chargements de plus en plus importants. De plus, il existe aussi un grand nombre de pathologies dans les ouvrages d'art dont les origines peuvent être mécaniques, physico-chimiques, accidentelles ou encore liées aux erreurs de calcul et de conception.

Les premières réflexions, recherches et études datent en fait, des années 90. C'est à cette époque, en raison de l'augmentation des dépenses d'entretien du patrimoine bâti et de la première crise de l'énergie, qu'est apparue la nécessité d'organiser et de rationaliser la maintenance (traitée de manière empirique dans le passé), afin de permettre une planification et une réduction des dépenses. De plus, pour apprécier concrètement et économiquement le poids de la maintenance, il faut rappeler que l'étude du coût global d'un bâtiment pour une durée de vie totale de l'ordre de 100 ans, montre que les coûts de réhabilitation à mettre en œuvre après la réalisation, sur une période de 90 ans, représentent 70 à 80 % de l'ensemble des dépenses. Ces enjeux économiques ont été à l'origine de la mise en place des plans de maintenance, qui vont du diagnostic et l'évaluation des ouvrages jusqu'à la mise au point de la technique de réhabilitation. Ainsi, et depuis plusieurs décennies, différentes techniques de réhabilitation (réparation ou renforcement) ont déjà été mises au point : le béton projeté, la précontrainte additionnelle ou encore le collage des tôles d'acier.

Grâce à leurs caractéristiques mécaniques et physico-chimiques, les matériaux composites se sont taillé une place importante en génie civil. De nos jours, le collage de matériaux composites est l'une des méthodes de réhabilitation les plus utilisées dans ce marché en pleine expansion. Plusieurs éléments de structure peuvent être renforcés par collage de plaques en matériaux composites. Il y a plusieurs axes de recherches dans ce domaine en pleine

expansion qui ont pour but d'aboutir à un renforcement optimal des structures. Notons à titre d'exemple des recherches sur la durabilité du renfort, les problèmes du délaminage au niveau de l'interface béton-composite et la modélisation du comportement de structures renforcées.

I. 2. Dégradation par fissuration des ouvrages en béton armé :

I. 2. 1. Introduction:

En 1997, le CTTP a mené des enquêtes concernant l'état des ouvrages d'art en Algérie (dossier n°1956 : saisi des données de 2562 ouvrages d'art en Algérie). Il apparaît que les structures en béton armé sont soumises à des conditions environnementales difficiles ou amenées à recevoir des surcharges importantes. En fait, les pathologies les plus fréquemment citées concernent deux domaines : la corrosion des armatures et l'étanchéité. Des défauts de compacité du béton, facilitant la pénétration des agents agressifs comme les chlorures ou les sels, constituent la cause la plus importante de la dégradation des ponts en béton armé par exemple.

La présence de déformation ou de fissuration inhabituelles est bien souvent le signe visible d'une pathologie. Les quatre principaux symptômes de la dégradation des ouvrages en béton sont les suivants :

- Les fissures,
- Les épaufrures (fragments de béton détachés de la masse de l'ouvrage),
- L'écaillage (décollement de la couche de mortier de peau laissant les granulats à nu),
- La désintégration (désorganisation de la peau du béton pouvant se poursuivre par une destruction avancée du béton).

La fissuration est de loin le symptôme le plus fréquent mais des dégradations d'apparence identique peuvent avoir des causes d'origine différente, voire résultat d'une combinaison de plusieurs causes.

I. 2. 2. L'un des principaux symptômes de la dégradation du béton : la fissuration

I. 2. 2. 1. La fissuration normale du béton armé :

La fissuration d'une structure en béton armé, lorsqu'elle est peu visible et limitée aux zones en traction, peut être en général considérée comme normale. Le fonctionnement logique d'une pièce en béton prévoit localement un certain nombre de fissures très fines sans qu'il y ait lieu de s'alarmer. L'Eurocode 2 s'intéresse d'ailleurs aux états limites de fissuration, en précisant que la fissuration doit être limitée de façon à ne pas porter préjudice au bon

fonctionnement de la structure mais qu'elle est presque inévitable pour les ouvrages de béton armé soumis à la flexion, au cisaillement, à la torsion ou à la traction sous l'action d'un chargement direct ou d'une déformation imposée. Vis-à-vis de la fissuration due aux actions directes (charges classiques appliquées à une structure), l'Eurocode 2 permet un contrôle de l'ouverture des fissures sans calcul véritable.

La fissuration reflète le comportement normal du béton armé. Cependant, une fissuration visible peut être un signe de dysfonctionnement et doit à ce faire l'objet d'une analyse sérieuse. Cette analyse devra dans un premier temps déterminer l'origine de la fissure.

I. 2. 2. 2. Quelques origines possibles des fissures:

Une fissure est la manifestation visible d'un état de contrainte anormal, de traction ou de cisaillement, qui a atteint la limite de rupture du matériau. Une fissure de flexion ne ressemble certes pas à une fissure due à la corrosion, mais il n'en demeure pas moins qu'elles sont toutes issues d'un dépassement de la contrainte limite de traction à un moment donné de la vie de l'ouvrage.

Classification :

- Fissures de compression, conséquences du gonflement du matériau dû à l'effet de Poisson,
- Fissures de traction pure résultant d'une traction directe,
- Fissures de flexion dues à l'allongement de la fibre tendue,
- Fissures de cisaillement dues aux contraintes de traction principales,
- Fissures de retrait dues à des efforts de traction superficielle conséquences d'une perte de volume,
- Fissures thermiques ou hygrométriques dues à des efforts de traction engendrés par la contraction d'une pièce bridée,
- Fissures dues au gel qui ont pour origine la rupture du béton sous la poussée due au gonflement de l'eau sous l'effet du gel,
- fissures résultant de la corrosion,

I. 2. 2.3. Caractéristiques des fissures:

Selon leur origine, les fissures offrent un faciès et un tracé typique. De plus, leur forme et leur direction peuvent renseigner l'observateur sur la cause des désordres.

Les fissures sont habituellement caractérisées par :

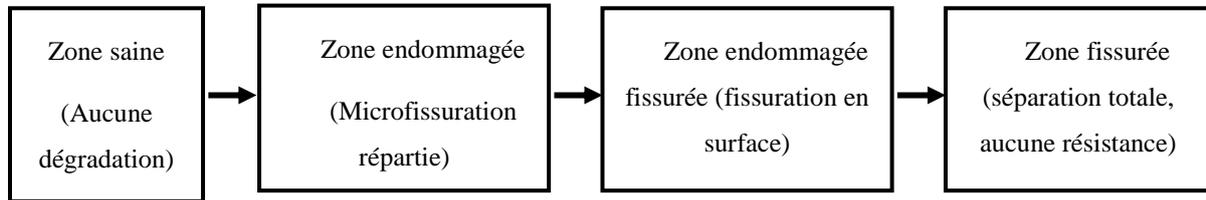
- **leur âge** : cette indication pourtant précieuse, est parfois difficile à obtenir lorsque la fissure n'est pas provoquée par une cause accidentelle et signalée. La connaissance de l'âge de la fissure peut permettre de renseigner l'observateur sur la cause des désordres. Mais elle permet surtout de se faire une idée sur l'injectabilité de la fissure. En effet, une fissure risque avec le temps de se trouver partiellement obstruée et donc d'être difficilement injectable. Il est couramment admis qu'une fissure de moins de deux ans ne présente pas de difficultés d'injection, alors qu'au-delà, le résultat est plus aléatoire.
- **le tracé** : le tracé d'une fissure se définit par son orientation (souvent révélatrice de son origine) et sa longueur mesurable sur l'ouvrage. Lorsque la fissure est continue sur l'axe d'orientation, elle est appelée fissure franche. Lorsque l'axe d'orientation est défini par plusieurs fissures successives, elle est dite discontinue.
- **l'ouverture** : elle peut s'évaluer facilement à l'œil nu sur son tracé en prenant un repère sur un réglet, ou au moyen d'appareils de mesure spécialisés, tels que le fissuromètre, le compte fil, la jauge d'épaisseur. L'ouverture d'une fissure est donnée par l'ouverture maximale relevée sur le tracé. Une précision du dixième de millimètre est généralement atteinte.
- **la profondeur** : une fissure peut être traversant lorsqu'elle est visible sur au moins deux faces de la structure. Elle est aveugle quand elle est supposée traversant mais débouche sur une face non accessible de l'ouvrage. Ce type de fissure est en général d'ouverture importante et peut laisser passer des fluides comme l'air ou l'eau qui présentent un danger vis-à-vis de la durabilité des armatures d'acier. Enfin, elle sera dite de surface lorsque son ouverture est maximale en surface et nulle au sein du matériau.
- **l'activité** : elle caractérise la variation dimensionnelle de l'ouverture de la fissure dans le temps. Les fissures dont l'ouverture reste constante quelles que soient les variations de température ou de charge sont appelées fissures mortes; Au contraire, seront qualifiées de fissures actives celles dont l'ouverture varie en fonction de facteurs extérieurs tels que la température, la charge, etc....

La connaissance des éléments précédents doit permettre de déterminer si la fissuration est superficielle ou au contraire plus profonde, morte ou en évolution. Mais indépendamment de ces éléments, il faut avant tout considérer le rôle mécanique de la fissure.

I. 2. 2. 4. Rôle mécanique de la fissure:

Le béton est un matériau fragile, dans lequel une fissure est le signe d'un dépassement d'une contrainte de traction. Mazars a montré qu'après une phase de microfissuration, plus ou

moins répartie dans un volume sollicité, une localisation des phénomènes conduit à la formation d'une fissure unique. La fissure correspond à un endommagement ultime localisé du matériau. Parallèlement à la fissuration, se développe une zone importante d'endommagement, siège de cette microfissuration répartie comme :



Le problème de la fissure ne se pose véritablement que lorsque celle-ci a une influence défavorable sur le comportement mécanique de l'élément considéré (diminution de la capacité portante). Avant cette étape, la présence d'une fissure n'est pas alarmante si ce n'est que l'aspect esthétique et surtout l'étanchéité aux agents agressifs doit être préservés. Les recommandations quant à la fissuration de règlements s'appliquent plutôt aux états limites de service. Mais, pour chacune des pathologies qui vont maintenant être évoquées, l'examen du symptôme que constitue la fissuration doit être tout d'abord relié à des notions comme la capacité portante de l'ouvrage, qui intéresse davantage l'état limite ultime.

I. 2. 3. Corrosion des armatures :

Il est établi que le phénomène de corrosion des armatures d'une structure en béton armé peut être divisé en deux périodes: une période d'initiation et une période de propagation, le passage de l'une à l'autre correspondant à la dépassement de l'acier. La durabilité des constructions est en principe assurée par le béton qui protège physiquement et chimiquement l'acier de la corrosion. La capacité de protection offerte par le béton peut s'évoluer en termes de qualité de recouvrement et d'épaisseur d'enrobage.

Cependant deux processus peuvent altérer cette protection :

- la diminution du PH de la solution interstitielle du béton en raison de la carbonatation,
- la pénétration d'agents agressifs, en particulier les ions chlore jusqu'au niveau des armatures.

I. 2. 3. 1. Carbonatation et corrosion des aciers :

Il est important de retenir que le béton est un matériau basique et que, pour cette raison, il est vulnérable aux attaques acides et, plus particulièrement, à celles faisant intervenir des acides forts. La carbonatation est une réaction chimique entre la chaux du béton et le dioxyde

de carbone de l'air qui a pour effet d'abaisser le pH de la phase interstitielle du béton. Les conséquences de cette réaction chimique sont très dommageables pour les armatures qui se trouvent à un pH où elles ne sont plus passivées et peuvent alors se corroder (figure I-1).

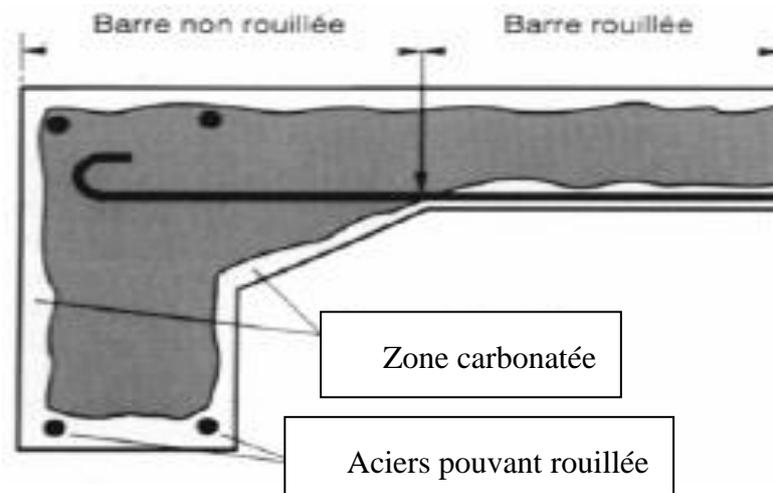


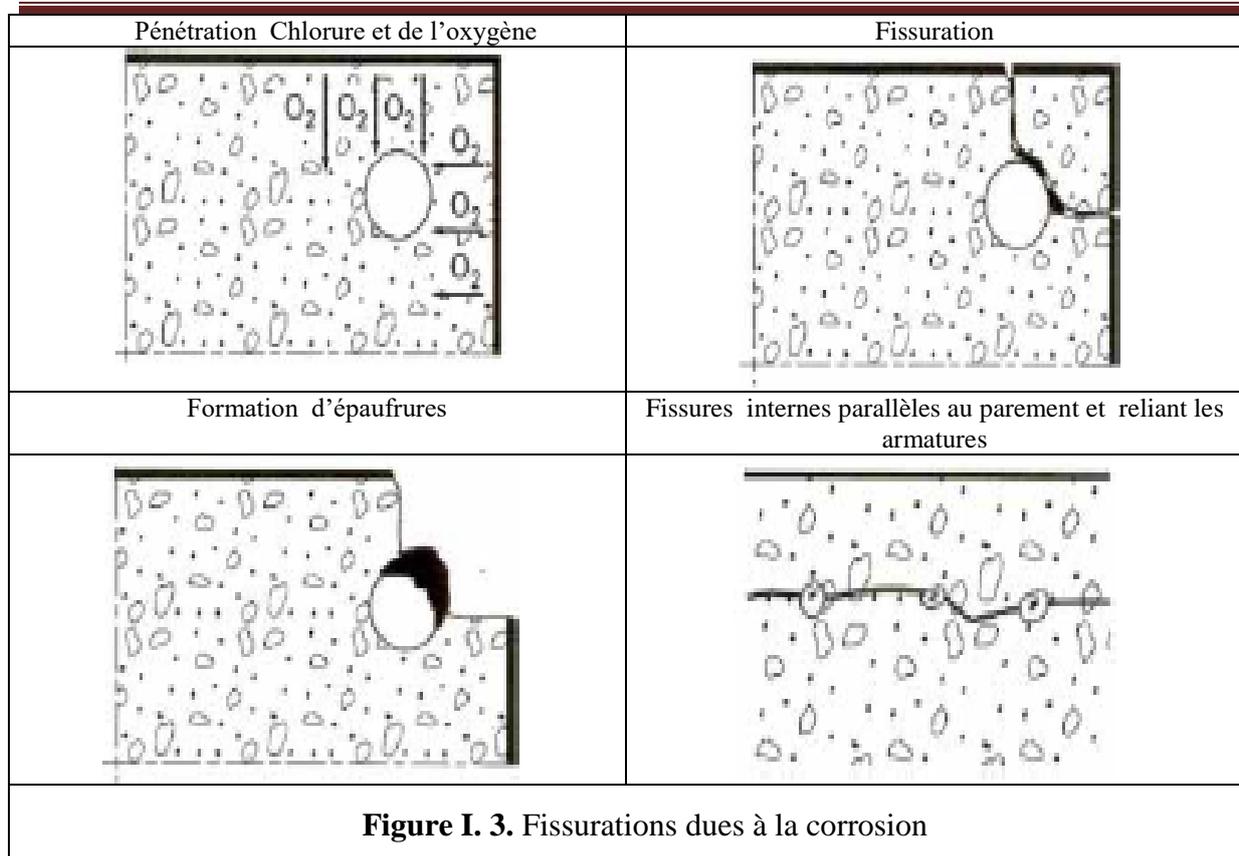
Figure I. 1. Carbonatation d'une pièce de structure



Figure I. 2. Corrosion des armatures

I. 2. 3. 2. Conséquences de la corrosion :

La corrosion de l'acier provoque la réduction de la section de l'armature (partiellement, localement ou en totalité). De plus, la réaction chimique de formation de la rouille (mélange d'oxydes et d'hydroxyde de fer) s'effectue avec une expansion (le volume de l'acier devient 3 à 4 fois supérieur). Ce gonflement provoque dans le béton des contraintes d'expansion importantes, supérieures à la résistance à la cohésion du béton. La manifestation visuelle qui en résulte se présente sous forme de fissures en surface qui s'amorcent à partir de l'acier.



Des fissures internes reliant les armatures peuvent aussi disloquer le béton. La décohesion peut présenter des pustules ou des plaques de béton. Les manifestations diffèrent selon l'épaisseur du béton, l'écartement et le diamètre des aciers, il en résulte que l'élément en béton armé ne fonctionne plus, au point de vue de la résistance des matériaux, comme il avait été calculé primitivement. À la limite, cet état de déséquilibre peut entraîner la ruine par l'effondrement de l'ouvrage.

I. 2. 4. Agressivité du milieu extérieur :

- **gel dégel:** les symptômes les plus courants sont l'écaillage présent à la surface de la structure, et le gonflement de tout ou partie de la structure accompagné le plus souvent d'une fissuration en réseau. Une désagrégation parfois complète du matériau peut se produire à l'état limite ultime,
- **sels de déverglaçage:** l'emploi de sels fondants accroît les dégâts sur les ouvrages pendant les périodes hivernales, ils se manifestent sous quatre formes : micro- fissuration du matériau résultant du choc thermique créé par le sel qui fait fondre la couche de glace en abaissant la température du support, écaillage des surfaces qui s'explique par l'augmentation des pressions osmotiques au voisinage de la surface en raison de l'augmentation de la teneur en sel, pénétration des chlorures sur plusieurs centimètres de

profondeur entraînant la corrosion de l'acier, attaque chimique provoquée par la présence d'agents agressifs contenus dans les sels (sulfates, alcalins...)

- **réaction sulfatique:** ces réactions sont provoquées par l'action des sulfates provenant du milieu extérieur ou des granulats avec la chaux et les aluminates du ciment. Le produit final de ces réactions est l'ettringite secondaire dont le développement au sein du béton provoque une expansion qui altère les caractéristiques mécaniques du béton,
- **action de l'eau de mer:** les effets de la mer sur le béton sont divers ; de l'érosion, de l'usure peuvent tout d'abord se manifester sous les chocs répétés de graviers et de sable. Des cycles d'humidification et de séchage, de chaud et de froid peuvent ensuite se produire. Le béton subit alors des contraintes de retrait et de gonflement hydrauliques. Enfin l'eau de mer contient des sels qui vont avoir une action sur les ciments : les éléments les plus dangereux sont les sulfates de magnésium et de calcium. Les désordres peuvent aller de la fissure à une dégradation complète du matériau.

I. 2. 5. Retrait et tassement du béton ; la fissuration précoce :

Il s'agit de la fissuration la plus pénalisante pour la durabilité des ouvrages. En effet, la fissuration précoce provoque des fissures ouvertes et surtout elle se produit avant que l'armature joue pleinement son rôle et qui résulte de quatre causes générales : le ressuage, le retrait plastique, le retrait thermique après prise, le retrait par auto- dessiccation.

I. 2. 6. Erreurs de conception – défauts d'exécution:

Des erreurs de conception peuvent se produire. Si elles sont relevées à temps, il sera possible de renforcer l'ouvrage avant de le mettre en service, c'est-à-dire avant de constater l'apparition de désordres. Dans le cas contraire, la réparation sera associée à un renforcement.

Un certain nombre de dégradation du béton peuvent être provoquées par une mauvaise exécution des travaux qui peuvent commencer dès la phase de fabrication :

- mauvaise formulation du béton,
- coffrages mal calculés, trop minces, déformables qui provoques des fissures et qui s'amorcent avant la fin de prise,
- mauvaise disposition des armatures : manque de recouvrement, insuffisance d'enrobage qui mène tout droit à la création de fissures parallèles aux armatures, à des épaufrures et à des éclats suite à la corrosion des aciers,
- absence d'armatures de peau pouvant provoquer des fissures traversantes et d'ouverture importante,

- mauvaises conditions de transport et de vibration du béton,

I. 2. 7. Fissuration accidentelle:

- **dégradation d'origine mécanique**, des attaques de type mécaniques peuvent se produire ; ils créent des épaufrures, des éclats importants du béton voire des ruptures d'aciers et peuvent donc affecter directement la capacité portante de l'ouvrage,
- **incendie**, qui a pour effet d'élever de façon rapide la température au sein du béton. Sur le plan mécanique ; la vaporisation brutale de l'eau se combine à une altération interne du béton pour créer des micro- fissurations, des écaillages voire des éclatements de béton, d'où une diminution de la section. Mais les désordres affectant les structures en béton armé proviennent plutôt des armatures, sous l'effet de la chaleur ; le ferrailage se dilate et peuvent perdre une part importante de leur résistance. C'est donc la capacité portante et la stabilité structurale qui sont directement affectées.
- **séisme**, même léger, un séisme peut être la source de désordres importants. Ceux-ci sont à craindre au niveau des fondations (effet de vibration modifiant la consistance du sol d'assise), aux liaisons poteaux/poutres ou mur/dalle (effet de cisaillement dû à la secousse). Sans aboutir forcément à l'effondrement de l'ouvrage, de tels événements peuvent gravement endommager des éléments porteurs de celui-ci , la stabilité de la construction ne sera plus assurée.
- **tassements- mouvements des appuis**, des tassements différentiels des fondations peuvent entraîner une fissuration. Les mouvements d'appuis sont dus soit à des affouillements et soit à des glissements de terrain. Ils entraînent dans la structure des déformations importantes.

La fissuration est prise en compte dans une certaine mesure dans les codes de calcul grâce à la notion d'armature adhérente minimale intervenant dans la condition de non fragilité. La fissuration est le symptôme le plus fréquent des ouvrages en béton armé mais la seule observation visuelle des fissures rend difficile le diagnostic. Indépendamment de l'observation de la fissuration, reflet de la dégradation, la question essentielle qui se pose est de savoir à partir de quand la dégradation a une influence sur le comportement mécanique de la structure. Cela revient à se demander à quel moment une réparation doit être envisagée et quelle sera son ampleur.

En effet, si une fissure est constatée, son rôle mécanique n'est pas toujours évident, un important motif de fissuration ne signifiant pas forcément que la capacité portante est affectée. Mais une fissure peut menacer la durée de vie de l'ouvrage dès qu'elle entame l'étanchéité de

celui-ci. C'est pour cette raison que des méthodes de réparation non structurales sont indispensables, elles sont employées lors de désordres mineurs.

Dès que la capacité portante et la stabilité de l'ouvrage sont menacées, ces méthodes ne sont plus suffisantes. Des méthodes structurales doivent alors être envisagées. Celles-ci ont pour but de réparer et/ ou de renforcer l'ouvrage. La réparation vise à compenser les pertes en rigidités, en résistance et ainsi redonner à la structure sa capacité portante originelle. Un renforcement consiste plutôt à consolider, à augmenter la capacité portante d'un élément et ainsi améliorer les performances et la durabilité de l'ouvrage.

I. 3. Méthodes de réparation et renforcement des ouvrages en béton armé :

I. 3. 1. Introduction :

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

Parmi les interventions de maintenance, on peut distinguer :

- Les interventions qui visent à maintenir l'ouvrage à l'état neuf : ce sont les interventions d'entretien qui ont un caractère préventif,
- Les interventions qui améliorent l'état de l'ouvrage lorsque le processus de dégradation a déjà commencé : il s'agit des interventions de réparation et/ou de renforcement.

Des solutions de réparations 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. Elles accompagneront les méthodes de réparation plus lourdes qui seront envisagées lorsque les désordres affecteront la stabilité de l'ouvrage. Ces méthodes seront alors qualifiées de structurales.

Les réparations et/ ou renforcements structuraux des ouvrages en béton armé peuvent être effectués soit par ajout de forces (cas de la précontrainte additionnelle), soit par ajout de matière (béton projeté et plats métalliques collés). Lors d'un ajout de matière, la section résistante de béton est reconstituée ou augmentée, mais pour qu'il y ait effectivement renforcement il faut que la partie ajoutée puisse être mise en charge.

Ces trois méthodes sont qualifiées de traditionnelles puisqu'elles sont couramment employées et faisant l'objet de normes ou de recommandations technique. Ceci n'est pas le

cas de la réparation et/ou du renforcement par des matériaux moins courants comme les composites. Dans un premier temps, les méthodes de réparation non structurales des ouvrages en béton armé sont évoquées. Puis, les principes du collage de plaques métalliques sur ceux-ci sont exposés. Enfin, on étudiera l'opportunité d'utiliser des matériaux composites.

I. 3. 2. Méthodes de réparation non structurales pour les ouvrages en béton armé :

Ce serait probablement une erreur de considérer que ces méthodes de réparation nécessitent moins de soin que l'application de techniques de réparation et/ou de renforcement dites structurales. L'existence de fissures, d'épaufrures voire de désintégration locale du béton entraîne une redistribution de contrainte vers les parties saines de la structure. Cette remarque est sans doute moins anodine qu'elle n'y paraît. Une redistribution d'efforts dans une structure peut entraîner des désordres beaucoup plus graves que ceux constatés initialement, en agissant notamment sur le comportement à l'état ultime de l'ouvrage.

Le problème des états de surfaces prend alors tout sa dimension et par conséquent des méthodes de reprise de ce béton dégradé doivent être appliquées si l'on veut éviter d'avoir recours dans l'avenir à des techniques de réparation et/ou de renforcement plus onéreuses et parfois plus délicates à mettre en œuvre. Et dans le cas d'utilisation de méthodes plus lourdes, ces méthodes légères seront utilisées afin de restaurer un bon état de surface.

La réparation par repris du béton dégradé suit généralement l'ordre chronologique suivant :

- préparation de la surface de béton à réparer,
- traitement des armatures éventuellement exposées,
- mise en œuvre d'un ou de plusieurs matériaux d'apport,
- protection du parement ainsi réparé.

I. 3. 2. 1. Préparation de la surface de béton :

L'objectif d'une bonne préparation de surface est de créer un support sain, propre et rugueux afin d'assurer une bonne adhérence au niveau de la surface reprise. Il est indispensable par conséquent d'enlever toutes les parties de béton non adhérentes au support. Dans des désordres consécutifs à la corrosion des armatures, il faut également effectuer un dégagement complet avec mise à nu de l'armature afin d'éliminer des zones de béton apparemment saines mais qui peuvent être polluées par des chlorures ou atteintes de carbonatation. Différents techniques existent pour éliminer le béton dégradé. Les plus classiques sont le sablage (à sec ou humide) ainsi que le décapage à l'eau à très haute pression, permettent d'obtenir d'excellents supports. La surface est ensuite nettoyée (en

général par un lavage à l'eau sous pression) puis débarrassée des excédents d'eau, la plupart des produits de réparation s'appliquant sur une surface humide mais non ruisselante. L'humidification de la surface facilite en effet l'accrochage des produits de réparation à base de liant hydraulique.

I. 3. 2. 2. Protection des aciers :

Lors de réparations de structures comportant des aciers apparents, ceux-ci ont en général perdu leur couche de passivation. Il est donc indispensable d'assurer une nouvelle protection aux aciers en place qui auront au préalable été débarrassés de la rouille (décapage par sablage, jet d'eau à haute pression ou brosse métallique). Si un pourcentage important de la section des aciers a disparu en raison de la corrosion, il faudra plutôt envisager de les remplacer ou d'ajouter des aciers passifs.

I. 3. 2. 3. Réparation du béton dégradé par apports de matériaux :

- **Ragréage :** les produits de ragréages peuvent être classés en trois catégories : des produits à base de liants hydrauliques, des produits à base de résines de synthèse et des produits mixtes à base de ciment et de polymère organique réactif. Le choix du produit est fonction de l'objectif de la réparation et dépend de nombreux paramètres comme les caractéristiques mécaniques et physico-chimiques des produits.
- **Traitement des fissures :** les traitements sont alors effectués en surface pour rétablir l'étanchéité ou en masse pour reconstituer le monolithisme de la structure en assurant un remplissage complet de la fissure. Le matériau introduit est de caractéristiques élevées et doit être adhérent afin de redonner à la structure sa capacité de fonctionnement initiale, la technique utilisée est celle de l'injection.

I. 3. 3. Méthodes de réparation structurales :

Les méthodes de réparation structurales des ouvrages en béton armé peuvent être effectués soit par ajout de forces (cas de la précontrainte additionnelle), soit par ajout de matière (béton projeté, adjonction d'armature complémentaire et renfort collés (plaques d'acier ou composites). La solution retenue pour renforcer ou réparer un élément doit satisfaire aux impératifs suivants :

- le monolithisme de l'élément doit être réalisé, afin de permettre un fonctionnement mécanique satisfaisant,

- les qualités des matériaux d'adjonction doivent être au moins égales à celles des matériaux constitutifs de l'ouvrage à renforcer ou à réparer.

Les procédés varient suivant la nature des éléments d'ossatures qu'ils concernent et suivant la nature des désordres ou des insuffisances. Les plus courants, éventuellement utilisés en combinaison, sont décrits dans les paragraphes suivants :

I. 3. 3. 1. Adjonction d'armature complémentaire :

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupés accidentellement ou lorsqu'il s'agit de renforcer une structure. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance des sections renforcées.

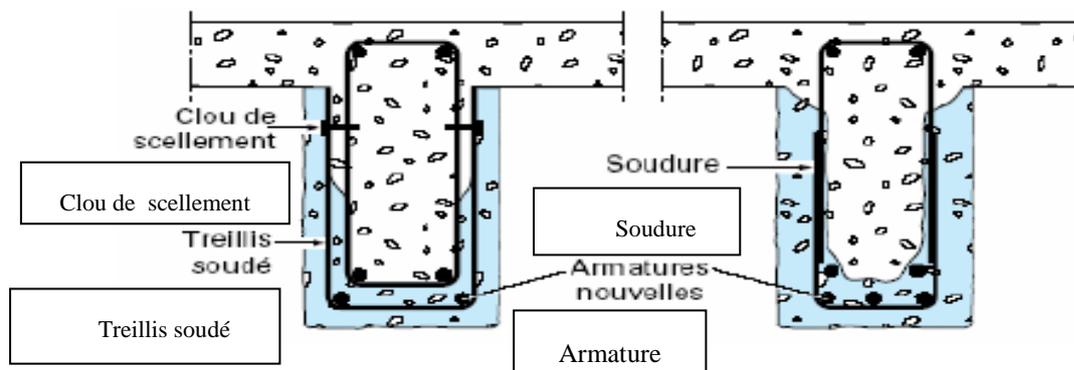


Figure I. 4. Réparation de poutre par adjonction d'armature

La protection de ces armatures est assurée par un béton coulé ou projeté et leurs jonctions avec les armatures existantes peuvent se faire par des procédés classiques (recouvrement,

I. 3. 3. 2. Béton projeté :

Cette technique, très au point, utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défaillantes que pour la réparation d'ouvrage endommagés, exige pour sa mise en œuvre un personnel spécialisé.

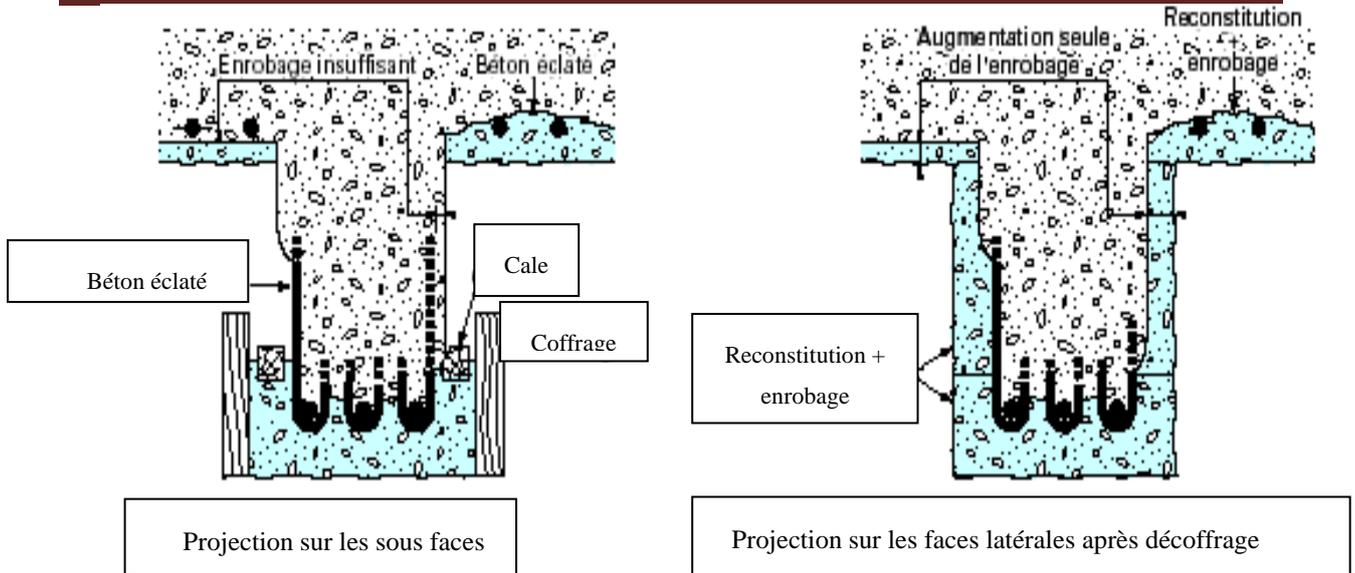


Figure I. 5. Réparation de poutre par béton projeté sans adjonction d'armatures complémentaires

Le béton projeté peut être, ou non, combiné avec l'adjonction d'armatures complémentaires. La projection est réalisée soit par voie sèche, soit par voie mouillée. Dans le premier cas, la grande vitesse de projection (80 à 100 m/s) fait que le procédé par voie sèche est particulièrement recommandé pour la réparation des ouvrages car il permet d'obtenir un béton très compact. Dans le second cas, la faible vitesse de projection (10 à 40 m/s) rend indispensable l'exécution préalable d'une couche d'accrochage. Après durcissement, le béton projeté possède les propriétés d'un béton coulé, puis vibré. La projection est possible dans toutes les directions, en particulier en plafond. Une description détaillée de cette technique est donnée par:

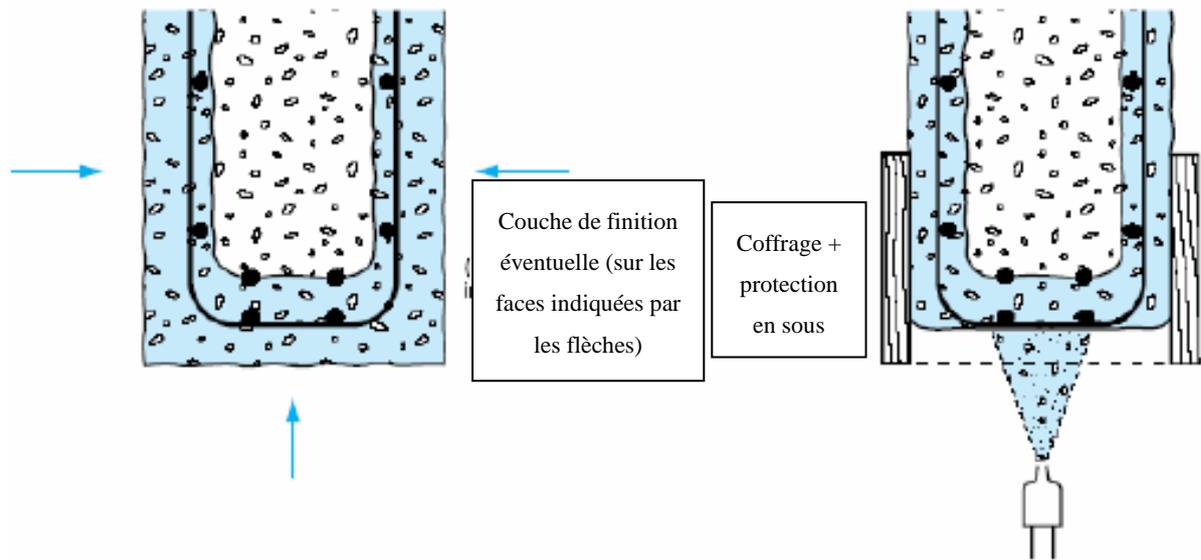


Figure I.6. Réparation de poutre par béton projeté avec adjonction d'armatures complémentaires

Selon la technique, les travaux de réparation par béton projeté se regroupent en deux catégories : les réparations superficielles et les réparations profondes. Grâce à son adhérence au support, à ses caractéristiques très proches de celles du béton coffré, aux possibilités de mise en place et d'enrobage d'armatures de renfort qu'il procure, le béton projeté permet de réaliser économiquement de telles réparations.

La difficulté de l'emploi de cette méthode provient essentiellement du mode d'application et de mise en œuvre (matériels, main d'œuvre et problèmes d'hygiène et de sécurité).

I. 3. 3. Précontrainte additionnelle :

Contrairement aux techniques présentées ci-dessus et qui consiste en l'ajout de matière (béton ou acier), la précontrainte additionnelle consiste en un ajout de force dans des ouvrages existants en vue soit de leur redonner leur état de service initial, soit de leur donner un nouvel état de service. Elle permet, en effet, d'appliquer des efforts d'une intensité connue, en des points et suivant des directions bien définies, capables de s'opposer aux efforts générateurs des désordres. Elle est réalisée le plus souvent par la mise en œuvre d'armatures de précontrainte (câble ou barres). La précontrainte additionnelle peut être employée pour traiter une grande variété d'ouvrage (ponts, barrages, réservoirs, bâtiment). Cette méthode est particulièrement adaptée au renforcement en flexion et vis-à-vis de l'effort tranchant par l'emploi d'étriers actifs.

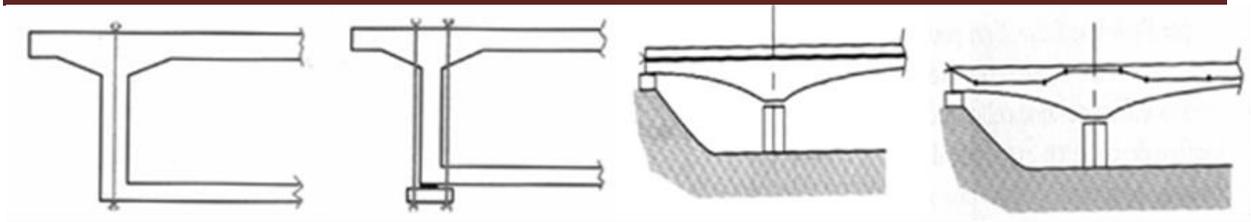


Figure. I.7. Différents types de réparation par précontrainte additionnelle

I. 3. 4. Réparation et renforcement à l'aide des tôles métalliques collées :

La technique du collage acier – béton s'est développé au début des années soixante à l'apparition sur le marché de colles, en particulier des résines époxy possédant des caractéristiques d'adhésion élevées, susceptibles de transmettre des efforts non négligeables. Ce procédé consiste en 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. Cette technique qui fut utilisée d'abord dans le domaine du bâtiment industriel, s'est vite répandue dans le domaine des ouvrages d'art, elle a permis soit d'accroître la capacité portante d'un ouvrage, soit de renforcer localement une structure présentant des insuffisances de résistance. Elle est applicable aux structures en béton armé et aux zones fonctionnant en béton armé des structures précontraintes.

Le renforcement de structure par plats métalliques, mieux connues sous le nom de procédé l'Hermite, consiste à coller des plats en acier sur les faces tendues de structures en béton armé. Ce procédé consiste en un apport d'armature extérieure soit pour consolider un élément dont les dégradations mettent en péril la résistance, soit pour remplacer des aciers oubliés ou mal positionnés. Ainsi, L'Hermite s'est intéressé, dès le début des années soixante, à l'utilisation des composés adhésifs de type époxy polymérisant à froid pour associer béton et acier. En effet, cette technique a été particulièrement étudiée par L'Hermite afin d'assurer la réparation et le renforcement de structures en béton armé présentant des insuffisances à la flexion et s'est développée suite à l'apparition sur le marché de colles, en particulier des résines époxy possédant des caractéristiques d'adhésion élevées, susceptibles de transmettre des efforts non négligeables. D'après la recherche de Theillout, trois problèmes mécaniques se posent lors de l'utilisation de tôles extérieures collées au béton pour le renforcement des structures: la mise en flexion locale de la tôle au voisinage des fissures qu'elle recouvre, la répartition des efforts entre tôles dans le cas d'un empilement et la répartition des déformations entre les aciers internes au béton et les aciers collés extérieurement.



Figure I.8. Renforcement d'un viaduc par tôles collées

Cette technique de réparation ou de renforcement par les tôles collées est aujourd'hui une technique maîtrisée et parfaitement au point. Sa simplicité la rend particulièrement attractive et son utilisation fréquente est en partie liée au développement d'adhésifs de haute qualité ; de plus, les dimensions de la structure ainsi réparée ne sont que très peu modifiées. D'un point de vue technique, il est à souligner que la distribution de contrainte dans le système varie peu à condition que le dimensionnement de la plaque rend possible une rupture de type ductile en flexion.

Cependant, cette technique connaît quelques limites. Le premier problème rencontré est celui de la corrosion de l'acier qui rend nécessaire la protection des surfaces. Cette corrosion est dangereuse en particulier si elle se produit à l'interface plaque- colle car elle risque de provoquer un décollement de la tôle. La manipulation des plaques sur chantier est rendue difficile par les sections importantes mises en œuvre. Enfin, les longueurs des tôles sont limitées (5m) et il est nécessaire de réaliser un joint entre deux plaques consécutives pour des portées trop importantes.

I. 3. 5. Réparation et renforcement par collage des matériaux composites :

I. 3. 5. 1. Utilisation des composites dans le génie civil :

Les matériaux composites sont utilisés dans le domaine de l'aérospatiale, des transports aériens et terrestre, mais également dans la fabrication d'article de sport, leur utilisation en génie civil est pour l'instant moins développée. L'utilisation des renforts textiles, au sein de

composites mettant en œuvre de matrices souples (thermoplastiques) est bien connue dans la construction, sous la forme d'éléments de couverture métallos-textiles notamment.

En revanche, on connaît moins leur utilisation en association avec des matrices rigides (thermodurcissables), ils sont alors généralement utilisés sous forme d'armatures composites (tendons de précontrainte, barres ou grilles d'armatures) ou bien sous forme de plaques, lamelles ou tissus pour la réhabilitation de structures existantes.

La réhabilitation de structures existantes par FRP est une autre possibilité d'utilisation de ces matériaux dans le génie civil. Aujourd'hui, la recherche s'intensifie dans ce domaine et les applications de ces matériaux dans le génie civil se diversifient.

I. 3. 5. 2. Remplacement des tôles métalliques par des matériaux composites à fibres de carbone:

Dans le domaine du génie civil, une phase de consolidation a succédé à la période 1960-1990. La construction en masse d'ouvrages d'art, de grands immeubles et d'installations industrielles, a laissé place à des opérations de maintenance qui, souvent, se traduisent par la nécessité de renforcement des structures. Qu'il s'agisse de réparations à la suite de désordres ou de simple mise en conformité avec des codes de plus en plus exigeants, nombreux sont les exemples de telles opérations. Jusqu'à présent, parmi les types de renforcements utilisés, le collage extérieur de plaques métalliques, selon le procédé L'Hermitte est l'un des plus répandus dans le monde en raison des avantages qu'il présente:

- il n'exige que des interventions mineures sur la structure ;
- il est d'un emploi souple ;
- les renforts sont peu encombrants.

Toutefois, le collage de tôles métalliques présente aussi quelques difficultés :

- sensibilité de l'acier à l'oxydation (il demande donc une protection et un entretien soigné);
- impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles, même sous faible épaisseur (solicitation le long d'une face);
- nécessité d'une préparation spécifique de la surface à traiter (la raideur des tôles nécessite une surface parfaitement plane pour assurer l'uniformité de l'épaisseur de l'adhésif) ;
- nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine de collage ;
- la manipulation des plaques sur chantier est rendue difficile par les importantes mises en œuvre. Enfin, les longueurs de tôles sont limitées et il est nécessaire de réaliser un joint entre deux plaques consécutives pour des portées trop importantes.

Ces difficultés, ajoutées aux besoins de renforcements de bâtiments dans certaines régions à risque sismique ont favorisé la recherche et le développement de l'utilisation des matériaux composites à fibres de carbone, pour renforcer ou réparer les structures du génie civil.

La réparation par tôle n'est certainement pas à proscrire et dans de nombreux cas il n'est pas nécessaire de la remettre en question, puisqu'elle a largement fait ses preuves. Il est cependant intéressant de proposer une alternative dans le cas où des conditions environnementales difficiles ou bien des difficultés de mise en œuvre risquent de compromettre l'efficacité de la technique.

I. 3. 5. 3. Application des matériaux composites pour la réparation et le renforcement des ouvrages en béton armé :

Contrairement à la réparation par tôles, divers matériaux composites sont disponibles pour renforcer des éléments de structure. Les situations de réparation et de renforcement étant diverses et variées, il faut donc déterminer un matériau composite adapté à chaque problème rencontré et sélectionner un adhésif qui garantira l'efficacité de la technique.

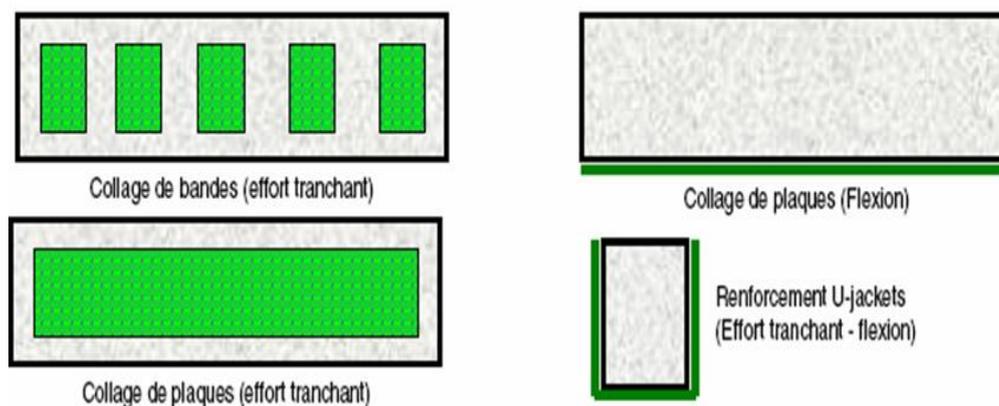


Figure I.9. Différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques en composites

Les matériaux composites présentent des avantages indéniables (caractéristiques mécaniques, poids, durabilité vis-à-vis des agressions chimiques) 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 collées doit permettre d'utiliser les matériaux composites avec d'autant plus de facilité. Pour notre étude, nous nous sommes orientés vers les matériaux composites à base de fibres de carbone, et plus particulièrement vers des composites unidirectionnels. Leur utilisation dans le cadre de renforcement mais également de réparations d'éléments fissurés fera l'objet des chapitres suivants.

	
<p>Ponçage de la surface</p>	<p>Découpage du tissu</p>
	
<p>Mise en place de la résine</p>	<p>Imprégnation du tissu</p>
	
<p>Mise en place du tissu</p>	<p>Rouleau ébulleur</p>

Figure I. 10. Procédé de mise en œuvre de collage du tissu



Figure I. 11. Mise en œuvre d'une réparation par stratification

I. 4. Conclusion:

Le renforcement des poutres en béton armé à l'aide de plaques en matériaux composites, tel que plusieurs recherches l'ont démontré, semble améliorer de manière importante le comportement structural des poutres. Cependant, d'après la revue bibliographique, les concepts liés aux techniques et solutions pouvant limiter certains formes de rupture et de comportement (peeling-off, délaminage, fragilité, etc ...) sont encore à éclairer davantage. Il s'est ainsi avéré nécessaire d'intégrer les effets d'orientation des fibres de composite et l'influence des phénomènes d'interface poutre – plaque et d'ancrage dans la détermination des moments ultimes des poutres renforcées

Chapitre2 :

Généralités sur les matériaux composites

II. Généralités sur les matériaux composites

II. 1. 1. Introduction :

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduits, liberté de forme. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés. Ils offrent une meilleure isolation thermique, et pour certains d'entre eux une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger les structures et de réaliser des formes complexes aptes à remplir plusieurs fonctions.

Dans chacun des marchés d'application (bâtiments, automobile, équipements industriel...). Ces performances remarquables sont à l'origine de solutions innovantes. Les matériaux composites offrent aux industriels et aux concepteurs de la possibilité nouvelle d'associer fonctions, formes et matériaux au sein de la réalisation. C'est un système de plus en plus performant.

II.1.2. Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux ou plus de nature différente; ce complément permet d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composantes prises séparément.

Les matériaux composites structuraux sont principalement constitués de deux phases :

- **Le renfort** : son rôle est d'assurer la fonction mécanique. Il se présente généralement sous la forme des fibres dont l'orientation au sein du composite dépend de la sollicitation mécanique qu'elle doit supporter.
- **La matrice** : son but est de réaliser la liaison entre les renforts, leur protection vis-à-vis des agents agressifs et la prévention contre une rupture catastrophique.

D'une manière générale, les matériaux composites structuraux de part la nature du renfort sont fortement anisotropes, c'est-à-dire que leurs propriétés sont très différentes suivant la direction considérée. D'autre part, les matériaux composites sont légers, c'est-à-dire que les masses volumiques de leurs constituants sont de l'ordre de 1 à 3.5 g / cm³.

II. 1. 3. Revue des différents renforts disponibles :

Les principales fibres utilisées sont : Fibre de Carbone ; Fibre de Kevlar ; Fibre de Bore et Fibre de Verre (Berthelot, 2002).

II. 1. 3. 1. Les fibres de carbone :

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

1-Les fibres haute résistance classique (types : As4, As6, T300 et X635) ;

2-Les fibres à haute résistance module intermédiaire (types : IM6, X636);

3-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 3. 1:

Tableau II. 1 : Propriétés des fibres de carbone (Berthelot, 2002)

Propriétés en traction	HR	IM	HM
R_t (MPa)	3000 à 5000	4000 à 4500	47000 à 52000
E_{oT} (MPa)	220000 à 240000	235000 à 250000	275000 à 300000
A_R (%)	1.2 à 1.5	1.6 à 1.8	1.4 à 1.6
Masse volumique (g / cm ³)	1.75 à 1.8	1.75 à 1.8	1.7 à 1.8

R_T , E_{oT} et A_R sont respectivement la résistance à la rupture; le module de Young et l'allongement à la rupture.

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

II. 1. 3. 2. Les fibres de Kevlar :

Aromatique (les aramides). Actuellement, il existe deux types de produits : les fibres de Kevlar 49 et 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 Les fibres de Kevlar sont des fibres synthétiques à base de polyamide dans le tableau 2. 2.

Tableau II. 2 : Propriétés des fibres de Kevlar (Berthelot, 2002)

Propriétés en traction	Kevlar 49	Kevlar 29
R_t (MPa)	3000	2700
E_{oT} (MPa)	120000 à 130000	60000
A_R (%)	2.1	4
Masse volumique (g / cm ³)	1.45	1.44

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

II. 1. 3. 3. Les fibres de Verre :

Il existe une multitude de fibres de verre dont les propriétés dépendent de leur composition. Actuellement, trois types de fibres de verre sont commercialisés sous forme de files. Ce sont les variétés E, S et R. Ces deux derniers sont très voisines (l'une est Américaine et l'autre est Française).

Tableau II. 3 : Propriétés des fibres de Verre (Berthelot, 2002)

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

. 4. Notion sur les matrices :

Actuellement, on distingue deux catégories de matrices: les matrices organiques (résines synthétiques) et les matrices métalliques (Berthelot, 2002).

II. 1. 4. 1. 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 ».

II. 1. 4. 2. Résines thermodurcissables :

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 fond 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 et les phénoliques. Le tableau 3. 4 présente les propriétés physiques et mécaniques de ces résines après polymérisation.

Tableau II. 4 : Propriétés des Résines thermodurcissables (Berthelot, 2002)

Propriétés en traction	Polyester	Epoxyde	Polyamide	Phénolique	Silicone
E_{oT} (MPa)	30 à 90	30 à 100	Environ 90	20 à 60	20 à 60
A_R (%)	2000 à 3000	2500 à 4000	Environ 3000	1000 à 5000	Environ 3000
Densité (g / cm ³)	1.1 à 1.3	1.1 à 1.3	Environ 1.3	1.2 à 1.4	1 à 1.1

II. 1. 4. 3. Résines thermoplastiques :

Les résines thermoplastiques chauffées, elles 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 leurs mises en œuvre qui est grandement facile. Les variétés qui pourraient être appliquées sont: les poly sulfones, les polyarylsulfones, les polycarbonates et le nylon polyester thermoplastique.

II. 1. 4. 4. Les matrices métalliques :

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

II. 1.5. Problèmes liés à l'utilisation des matériaux composites dans le génie civil :

II. 1.5.1. Introduction :

Depuis les premières applications des composites en génie civil, qui remontent au début des années 1980, et avec le développement des différents procédés et techniques de mise en œuvre, l'utilisation des composites a largement intéressé les laboratoires de recherche et les organismes industriels. Cependant, et malgré les nombreux avantages qu'offrent les matériaux composites, (propriétés mécaniques élevés, poids faible, résistance à la corrosion, etc.), leurs adaptations aux applications de renforcement révèlent de nombreux problèmes. Ces problèmes peuvent être liés directement à la mécanique des composites (matériaux hétérogènes et anisotropes) qui restent toujours un sujet de recherche, ou encore les problèmes liés à la structure renforcées (décollement, durabilité, etc.).

II. 1.5.2. Résistance des matériaux composites :

En général, le composite est formulé pour satisfaire à des critères de résistances, de rigidité ou bien de tenue à l'action de l'environnement. Les propriétés finales dépendent des propriétés élémentaires de chaque constituant (figure 3. 1). L'évaluation des propriétés des matériaux composites se fait à différentes échelles. Il s'agit d'une approche multi- échelles : celle de la fibre élémentaire, du pli élémentaire puis du composite.

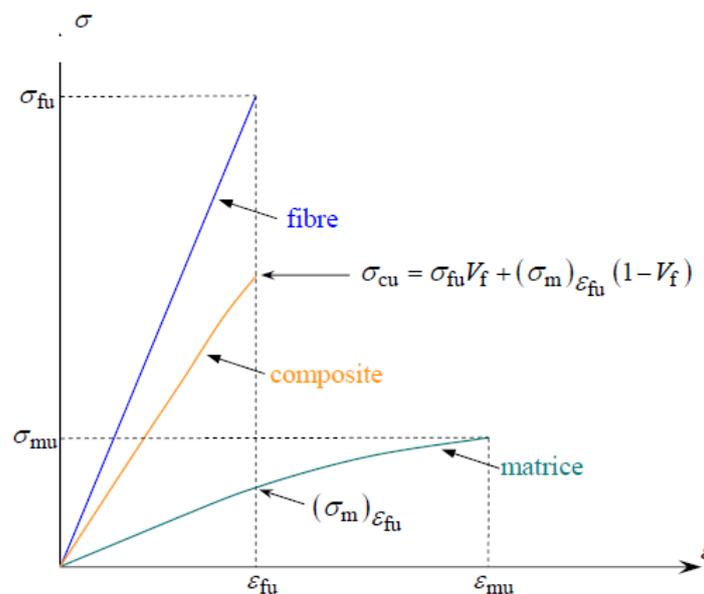


Figure II. 1 : relation contrainte déformation en traction pour les différents composants (Berthelot, 2002)

II. 1. 5. 3. Elasticité à différentes échelles :

A l'échelle de la fibre :

Expérimentalement, il a été montré (Berthelot, 2002) que la résistance moyenne des fibres diminue au fur et à mesure que sa longueur augmente.

A l'échelle du pli élémentaire :

A l'échelle du pli élémentaire, le matériau composite a deux directions privilégiées (figure 3. 2) : la direction longitudinale (L) et la direction transversale (T). Dans un matériau composite unidirectionnel, les fibres sont le plus souvent réparties d'une manière aléatoire, plutôt que suivant un arrangement régulier. Il n'existe pas qu'une seule possibilité d'arrangement des fibres mais une infinité de possibilités (Berthelot, 2002).

Des expressions simplifiées et pratiques des modules peuvent être obtenues en faisant une approche simplifiée du comportement mécanique de la cellule élémentaire du matériau composite unidirectionnel (Berthelot, 2002).

Si nous considérons un composite constitué de deux composants: une résine de caractéristiques E_m et ν_m et des fibres longues unidirectionnelles considérées isotropes et de caractéristiques E_f et ν_f , le taux volumique de fibres dans la résine est noté V_f .

Le matériau ainsi constitué est isotrope transverse dans la mesure où l'on observe une unique différence entre les caractéristiques selon les directions L et T.

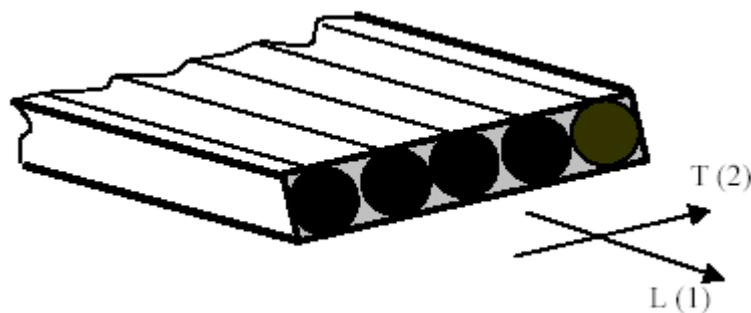


Figure II. 2 : Illustration d'un renfort fibreux unidirectionnel

Il existe des formules simplifiées qui permettent la prédiction de ces coefficients à partir des caractéristiques des constituants. Ces lois simplifiées sont connues sous le nom de lois des mélanges dans le cas des unidirectionnels. Ces lois de mélange s'inscrivent dans le concept

d'homogénéisation des caractéristiques de matériaux multi-phasiques ou hétérogènes (les composites notamment). Ces lois trouvent de nombreuses validations dans la littérature scientifique. Elles sont nombreuses et s'adaptent en fonction du type de constituant, du taux de fibre ou encore de l'arrangement des fibres dans la résine.

Un exemple de formule simplifiée est défini par les expressions suivantes, des caractéristique du mélange renfort – matrice (Berthelot, 2002):

- Teneur en masse de renfort : $M_{\text{fib}} = (\text{masse de renfort}) / (\text{masse total})$
- Teneur en masse de matrice : $M_{\text{m}} = (\text{masse de matrice}) / (\text{masse total})$

$$M_{\text{fib}} + M_{\text{m}} = 1 \quad (3-1)$$

- Teneur en volume de renfort : $V_{\text{fib}} = (\text{volume de renfort}) / (\text{volume total})$
- Teneur en volume de matrice : $V_{\text{m}} = (\text{volume de matrice}) / (\text{volume total})$

$$V_{\text{fib}} + V_{\text{m}} = 1 \quad (3-2)$$

La fraction volumique des fibres V_{fib} typique est de l'ordre de 0,60 – 0,65.

- Module d'élasticité du composite: $E_f = E_{\text{fib}} V_{\text{fib}} + E_{\text{m}} V_{\text{m}} \quad (3-3)$
- Résistance en traction du composite: $f_f = f_{\text{fib}} V_{\text{fib}} + f_{\text{m}} V_{\text{m}} \quad (3-4)$
- Coefficient de poisson du composite: $\nu_f = \nu_{\text{fib}} V_{\text{fib}} + \nu_{\text{m}} V_{\text{m}} \quad (3-5)$

où : E_f est le module d'Young du matériau composite dans la direction des fibres, E_{fib} le module d'Young des fibres, E_{m} le module d'Young de la matrice, V_{fib} la fraction volumique des fibres, V_{m} la fraction volumique de la matrice, f_f la résistance en traction du matériau composite, f_{fib} la résistance en traction des fibres, f_{m} la résistance en traction de la matrice, ν_f est le coefficient de poisson du composite, ν_{fib} est le coefficient de poisson des fibres, ν_{m} est le coefficient de poisson de la matrice. La résistance et le module d'Young des fibres sont plus importants par rapport à ceux de la matrice, le comportement mécanique des matériaux composites est donc piloté par les propriétés mécaniques des fibres et la quantité de fibres (fraction volumique).

- A l'échelle du composite multicouche :

Concernant le multi - couche, les propriétés du composite dépendent de l'orientation de l'empilement des couches élémentaires. Plusieurs approches existent concernant les modules d'élasticité. Dans un premier temps, nous pouvons citer les travaux de Berthelot qui ont

exprimé les rigidités de composite en considérant les modules de compression latérale des fibres et de la matrice ou en considérant le cisaillement transverse entre couches. Les développements de ces modèles prennent en considération des fibres de diamètre identiques réparties suivant un arrangement hexagonal.

Berthelot (2002) précise que, lorsque le rapport largeur sur épaisseur est inférieur à 10, les effets d'empilement de couches restent négligeables sur le comportement mécanique du composite. Les contraintes et les déformations d'un multicouche sont liées par des matrices de souplesses ou de rigidité (Berthelot, 2002).

Pour caractériser la réponse mécanique des composites, la théorie de l'élasticité linéaire a été adaptée à ces nouveaux matériaux anisotropes et aux structures multicouches, c'est la théorie des plaques stratifiées. En revanche, la possibilité de prédire sa résistance n'est toujours pas parfaitement remplie en raison, notamment, de la forte anisotropie du composite et donc de la variation de sa résistance en fonction de la direction et du signe des contraintes. Généralement, on distingue trois mécanismes élémentaires d'endommagement dans un composite, soit la rupture de la fibre, la fissuration de la matrice et la décohésion de l'interface fibre- matrice (figure 3. 3) (Berthelot 2002).

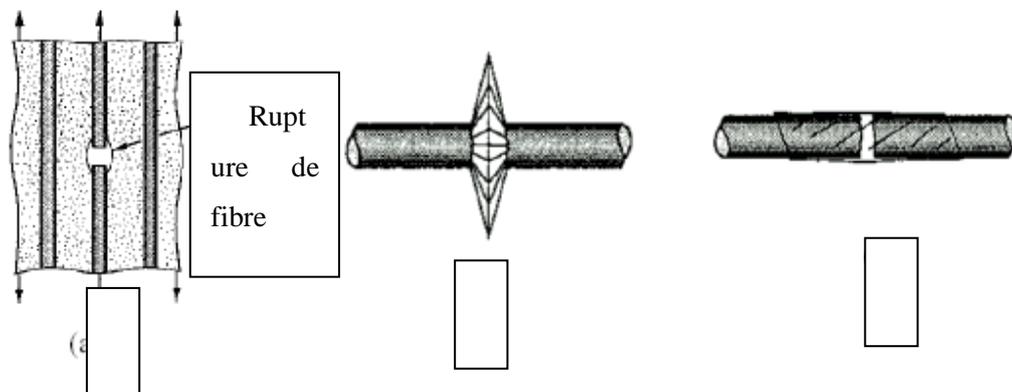


Figure II. 3 : Modes de rupture des matériaux composites (Berthelot, 2002):

a) rupture de la fibre, b) rupture de la matrice, c) rupture de l'interface fibre - matrice

II. 1. 5. 4. Adhésif :

Dans le cas d'une réparation d'une structure en béton armé par matériaux composite, il faut utiliser un adhésif pour coller la plaque composite sur la surface en béton. Un adhésif est nécessaire pour coller le matériau composite sur une surface, dont l'objectif est de transmettre

les contraintes de cisaillement entre le béton et le composite. D'après le bulletin 14 de la FIB, les caractéristiques typiques d'un adhésif époxy avec une cure à froid sont les suivants :

Tableau II. 5 : Caractéristiques typiques de l'adhésif d'époxy (FIB bulletin 14, 2001)

Densité (kg/ m^3)	1100 - 1700
Module d'Young (GPa)	0,50 - 20
Module d cisaillement (GPa)	0,80 - 8
Coefficient de Poisson	0,30 - 0,40
Résistance en traction (MPa)	9 - 30
Résistance à l'effort tranchant (MPa)	10 - 30
Résistance en compression (MPa)	55 - 110
Déformation en traction à la rupture (%)	0,50 - 5
Température de transition vitreuse ($^{\circ}\text{C}$)	45 - 80

II . 2. Présentation de la théorie des plaques stratifiées :

Cette présentation est consacré au développement des équations qui décrivent la réponse élastique linéaire des composites stratifiées soumise à des charges dans le plan et en flexion. Les couches individuelles sont supposées être homogènes, orthotropes, ou transversalement isotrope et dans un état de contraintes planes. Un stratifié type avec un système de coordonnées locales et globales est représenté dans la figure 3 .4.

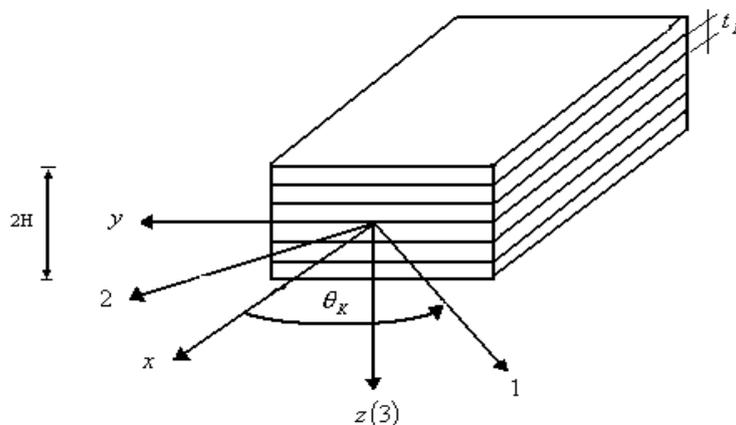


Figure II.4 : composite stratifié

II. 2. 1. Notation :

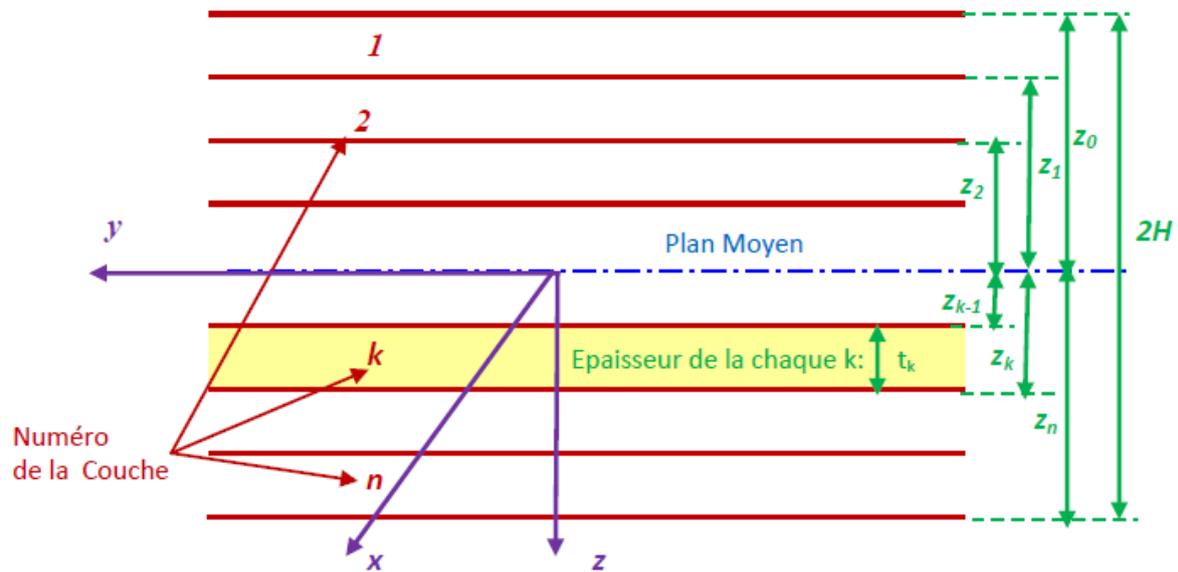


Figure II.5: Les coordonnées d'un stratifié

Pour le stratifié présenté dans la figure 3.5, nous prenons le système de coordonnées globales (X, Y, Z) avec l'axe Z perpendiculaire au plan du stratifié et est positif vers le bas. L'origine du système de coordonnées est localisée dans le plan médium du stratifié.

Le stratifié a « N couches » (plis) numérotées du haut vers le bas ; chaque couche a des orientations différentes des fibres notées θ_k . Comme c'est indiqué dans la figure 3. 5, l'épaisseur de chaque couche est $t_k = z_k - z_{k-1}$ et l'épaisseur totale est « $2H$ ».

Le tableau 3. 6 montre les notations décrivant les séquences d'empilement d'un stratifié.

Tableau II. 6 : Exemple des notations des stratifiés

Séquences des couches	Stratifié	Couches
8 couches @ 0°	[0 ₈]	8
2@ +45, 2@ -45 symétriques	[45 ₂ / -45 ₂] _s	8
+45 / -45 / +45 / -45 symétriques	[(±45) ₂] _s	8
+45 / -45 / 0 / 90 symétriques	[±45 / 0 / 90] _s	8
50 groupes [±45 / 0 / 90] symétriques	[(±45 / 0 / 90) ₅₀] _s	400
+θ , -θ symétriques	[±θ] _s	4

II. 2. 2. Hypothèses de la théorie des stratifiés :

Les hypothèses suivantes sont fondamentales pour la théorie des plaques stratifiées (Berthelot, 2002):

- L'interface entre les couches est parfaite (Continuité des déplacements et des déformations) ;
- Chaque couche est un matériau homogène avec des propriétés effectives connues ;
- Les propriétés de la couche individuelle peuvent être isotropes, orthotropes ou transversalement isotropes ;
- Chaque couche est dans un état de contrainte plane ;
- Le stratifié se déforme selon les hypothèses de « Kirchhoff - Love » pour la flexion et la traction des plaque minces :
 - La normale au plan médium reste droite et est normale au plan médium déformé après déformation ;
 - Les normales au plan médium ne changent pas de longueur.

II. 2. 3. Relation déformation – déplacement :

La première hypothèse de « Kirchhoff - Love » exige que les déformations de cisaillement γ_{zx} et γ_{zy} soient nulles.

La deuxième hypothèse de « Kirchhoff - Love » exige que le déplacement transversal suivant l'axe « Z » du plan médium est une fonction de x et y seulement c'est-à-dire $w = w(x, y)$

La figure 3. 6 illustre un schéma du plan X - Z d'une surface moyenne déformée.

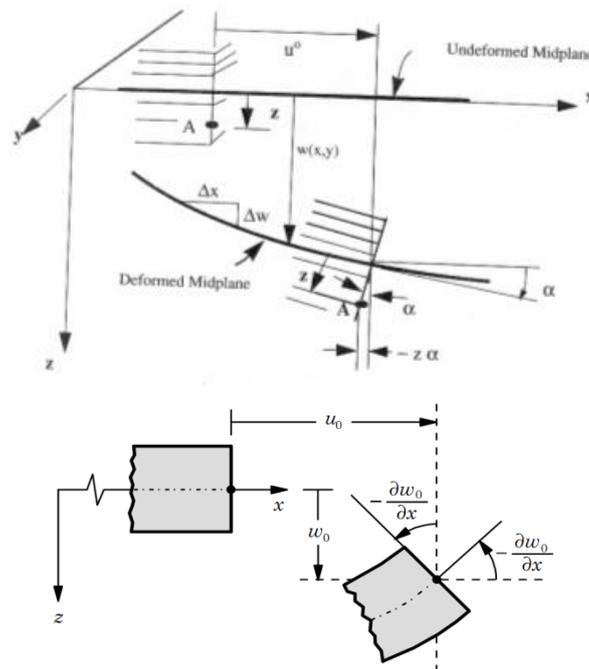


Figure II. 6 : Plan médium dans un stratifié déformé

Supposons que les déplacements sont petits, la pente α de la surface déformée sera aussi petite ce qui implique que :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\partial w}{\partial x} \approx \alpha \quad (3-6)$$

Le déplacement total « u » du point A (figure 3.6) peut être écrit comme la somme du déplacement du plan moyen u^0 plus le déplacement dû à la rotation α de la normale au plan moyen. Ainsi :

$$u = u^0 - z \operatorname{tg} \alpha = u^0 - z \alpha = u^0 - z \frac{\partial w}{\partial x} \quad (3-7)$$

De la même façon que pour le plan Y - Z, nous aurons :

$$v = v^0 - z \frac{\partial w}{\partial y} \quad (3-8)$$

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

Puisque les normales ne changent pas de longueurs, le déplacement transversal w est indépendant de « z » et peut être écrit sous la forme suivante : $w(x, y) = w^0(x, y)$ (3-9)

Où : l'indice supérieur « 0 » représente le plan médium.

Les équations déformations- déplacements peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u^0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \varepsilon_x^0 + z k_x \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v^0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \varepsilon_y^0 + z k_y \\ \gamma_{xy} &= \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{\partial u^0}{\partial y} - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial v^0}{\partial x} = \gamma_{xy}^0 + z k_{xy}\end{aligned}\quad (3-10)$$

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

$$k_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad k_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad k_{xy} = -2 \frac{\partial^2 w}{\partial xy} \quad (3-11)$$

En combinant les équations (II-10) et (II-11) nous aurons :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3-12)$$

$$\text{Ou plus simplement :} \quad \{\varepsilon_x\} = \{\varepsilon^0\}_x + z \{k\}_x \quad (3-13)$$

La dernière équation exprime les déformations totales $\{\varepsilon_x\}$ à chaque cotes « z » dans le stratifié en fonction des déformations au niveau du plan médium $\{\varepsilon^0\}_x$ et les courbures $\{k\}_x$, c'est l'équation fondamentale de la théorie des stratifiés.

II. 2. 4. Les contraintes :

L'expression des contraintes peut être maintenant déterminée en écrivant la relation qui existe entre ces dernières et les déformations et par l'utilisation de l'équation (3-13):

$$\{\sigma\}_x = [\bar{Q}]^k \{\varepsilon\}_x \quad (3-14)$$

Où : $[\bar{Q}]^k$ matrice de rigidité réduite transformée du k^{ieme} pli correspondant à la cote z.

Remarque : Un point très important dans l'utilisation des équations constitutives des stratifiés est que la matrice transformée $[\bar{Q}]^k$ varie avec l'orientation des fibres de chaque couche

A partir des équations (3-13) et (3-14), nous pouvons écrire :

$$\{\sigma\}^k = [\bar{Q}]^k \{\varepsilon^0\} + [\bar{Q}]^k z \{k\} \quad (3-15)$$

II. 2. 5. Les Forces par unité de longueur :

Les forces par unité de longueur $\{N_x, N_y, N_{xy}\}$ (figure 3. 7) sont définies comme suit :

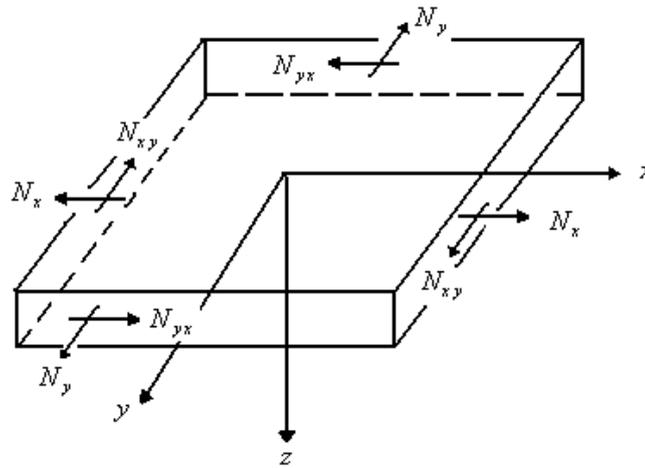


Figure II .7 : Forces par unité de longueur

$$\begin{aligned} N_x &= \int_{-H}^{+H} \sigma_x dz \\ N_y &= \int_{-H}^{+H} \sigma_y dz \\ N_{xy} &= \int_{-H}^{+H} \tau_{xy} dz \end{aligned} \quad (3-16)$$

Les trois équations peuvent être écrites sous la forme condensée : $\{N\} = \int_{-H}^{+H} \{\sigma\} dz$ (3-17)

A partir des équations (3-15) et (3-16), nous aurons :

$$\{N\} = \int_{-H}^{+H} [\bar{Q}]^k \{\varepsilon^0\} dz + \int_{-H}^{+H} [\bar{Q}]^k \{k\} z dz \quad (3-18)$$

$$\text{Ou bien sous une autre forme : } \{N\} = \sum_{k=1}^n \left(\int_{z_{k-1}}^{z_k} [\bar{Q}] dz \right) \{\varepsilon^0\} + \sum_{k=1}^n \left(\int_{z_{k-1}}^{z_k} [\bar{Q}]^k z dz \right) \{k\} \quad (3-19)$$

Cette dernière équation peut être écrite sous la forme suivante :

$$\{N\} = [A]\{\varepsilon^0\} + [B]\{k\} \quad (3-20)$$

$$\text{Où : } [A] = \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]^k (z_k - z_{k-1}) \quad (3-21)$$

$$[B] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]^k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (3-22)$$

Remarque : La matrice $[\bar{Q}]^k$ est constante à travers chaque couche mais peut être différente d'une couche à une autre.

L'équation (3-20) relie les forces de membrane par unité de longueur aux déformations du plan médium $\{\varepsilon^0\}$, et les courbures du stratifié $\{k\}$ par les matrices $[A]$ et $[B]$. La matrice $[A]$ représente « la matrice de membrane » et la matrice $[B]$ représente « la matrice de couplage membrane - flexion ».

II. 2. 6. Moments par unité de longueur :

On définit les moments par unité de longueur $\{M_x, M_y, M_z\}$ (figure 3.8) comme l'intégrale des forces « $\sigma_i z dz$ », ainsi :

$$M_x = \int_{-H}^{+H} \sigma_x z dz \quad M_y = \int_{-H}^{+H} \sigma_y z dz \quad M_{xy} = \int_{-H}^{+H} \tau_{xy} z dz \quad (3-23)$$

$$\text{Ou bien sous une forme condensée : } \{M\} = \int_{-H}^{+H} \{\sigma\} z dz \quad (3-24)$$

Substituant l'équation (3-15) dans l'équation (3-24), nous aurons l'expression des moments par unité de longueur :

$$\{M\} = [B]\{\varepsilon^0\} + [D]\{k\} \quad (3-25)$$

$$\text{Où la matrice de flexion est définie comme suit : } [D] = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]^k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (3-26)$$

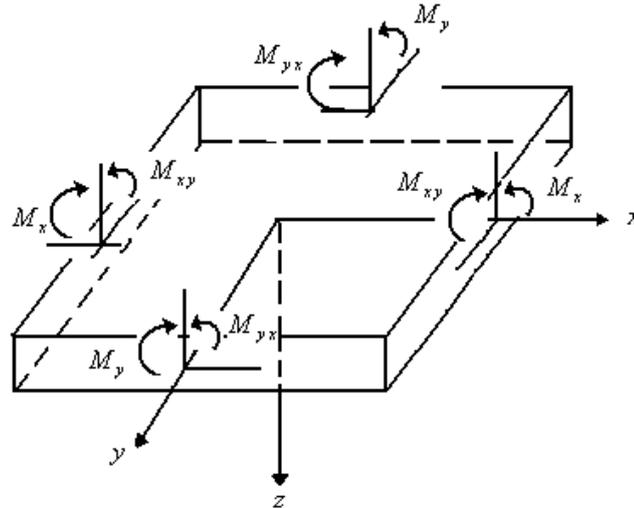


Figure II.8 : Moments par unité de longueur

II. 2. 7. Relations constitutives du stratifié :

Les équations (3-20) et (3-25) peuvent être combinées pour donner l'équation fondamentale de la théorie des stratifiés :

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{Bmatrix} \quad (3-27)$$

Cette équation peut être écrite sous une forme plus détaillée comme suit :

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3-28)$$

Les équations (3-27) ou (3-28) montrent clairement le couplage de la réponse en flexion et de membrane du stratifié, illustrée par la matrice $[B]$. Si la matrice $[B] = [0]$, alors l'effet de membrane est découplé de l'effet de flexion.

L'équation (3-27) peut être inversée pour donner l'expression suivante:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \quad (3-29)$$

Reprenons les équations (3-20) et (3-25)

$$\{N\} = [A]\{\varepsilon^0\} + [B]\{k\} \quad (3-30)$$

$$\{M\} = [B]\{\varepsilon^0\} + [D]\{k\} \quad (3-31)$$

La résolution de l'équation (3-30) donne : $\{\varepsilon^0\} = [A]^{-1}\{N\} - [A]^{-1}[B]\{k\}$ (3-32)

En substituant l'équation (3-32) dans l'équation (3-31), nous aurons :

$$\{M\} = [B][A]^{-1}\{N\} + ([D] - [B][A]^{-1}[B])\{k\} \quad (3-33)$$

Les équations (3-32) et (3-33) peuvent être écrites sous une autre forme :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A^* & B^* \\ C^* & D^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ k \end{Bmatrix} \quad (3-34)$$

Où :

$$\begin{aligned} [A^*] &= [A]^{-1} \\ [B^*] &= [A]^{-1}[B] \\ [C^*] &= [B][A]^{-1} \\ [D^*] &= [D] - [B][A]^{-1}[B] \end{aligned} \quad (3-35)$$

L'équation (3-34) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\{\varepsilon^0\} = [A^*]\{N\} + [B^*]\{k\} \quad (3-36)$$

$$\{M\} = [C^*]\{N\} + [D^*]\{k\} \quad (3-37)$$

A partir de l'équation (3-37), nous pouvons déterminer l'expression de la courbure $\{k\}$

$$\{K\} = -[D^*]^{-1}[C^*]\{N\} + [D^*]^{-1}\{M\} \quad (3-38)$$

Substituant l'équation (3-38) dans l'équation (3-36)

$$\{\varepsilon^0\} = ([A^*] - [B^*][D^*]^{-1}[C^*])\{N\} + [B^*][D^*]^{-1}\{M\} \quad (3-39)$$

Les équations (3-39) et (3-38) peuvent être écrites :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \quad (3-40)$$

Où :

$$\begin{aligned}
 [A'] &= [A^*] - [B^*][D^*]^{-1}[C^*] \\
 [B'] &= [B^*][D^*]^{-1} \\
 [C'] &= -[D^*]^{-1}[C^*] \\
 [D'] &= [D^*]^{-1}
 \end{aligned} \tag{3-41}$$

A partir des équations (3-41) et (3-35), nous aurons :

$$\begin{aligned}
 [A'] &= [A]^{-1} + [A]^{-1}[B][D^*]^{-1}[B][A]^{-1} \\
 [B'] &= -[A]^{-1}[B][D^*]^{-1} \\
 [C'] &= -[D^*]^{-1}[C^*] \\
 [D'] &= [D^*]^{-1}
 \end{aligned} \tag{3-42}$$

A partir des expressions de $[B']$ et $[C']$ (3-42), nous remarquons que :

$$[C'] = [B']^T \tag{3-43}$$

Ainsi, les équations (3-29) et (3-40) peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ B'^T & D' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \tag{3-44}$$

Ou bien sous une forme plus détaillée :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}' & A_{12}' & A_{16}' & B_{11}' & B_{12}' & B_{16}' \\ A_{12}' & A_{22}' & A_{26}' & B_{12}' & B_{22}' & B_{26}' \\ A_{16}' & A_{26}' & A_{66}' & B_{16}' & B_{26}' & B_{66}' \\ B_{11}' & B_{12}' & B_{16}' & D_{11}' & D_{12}' & D_{16}' \\ B_{12}' & B_{22}' & B_{26}' & D_{12}' & D_{22}' & D_{26}' \\ B_{16}' & B_{26}' & B_{66}' & D_{16}' & D_{26}' & D_{66}' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} \tag{3-45}$$

II. 2. 8. Stratifiés symétriques :

Pour un stratifié symétrique, la matrice de couplage $[B]$ est nulle. Cela peut être montré en considérant la contribution de deux couches identiques p et q (même matériau, même orientation des fibres et même épaisseur). Ces deux couches sont symétriques par rapport au plan médium (figure 3.9).

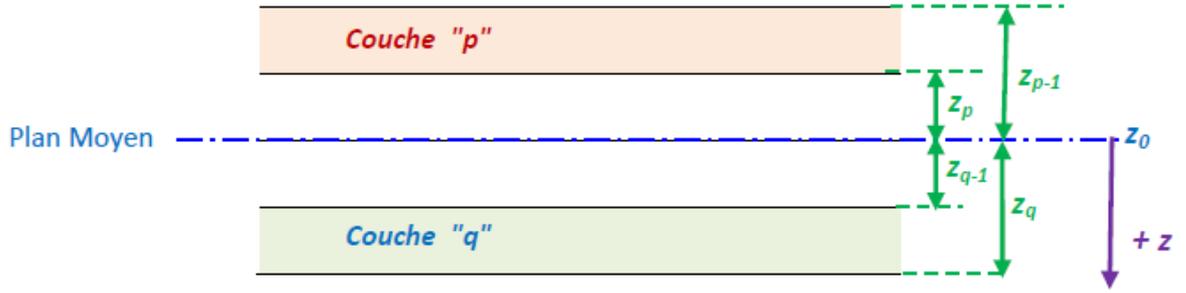


Figure II.9. Couches symétriques

Puisque les deux couches sont de même matériau et ils ont la même orientation de fibres (par rapport au repère global) nous pouvons écrire que :

$$\bar{Q}_{ij(p)} = \bar{Q}_{ij(q)} \quad (3-46)$$

Vu la symétrie des deux couches, nous aurons :

$$z_p = z_{q-1} \quad (3-47)$$

$$z_{p-1} = z_q \quad (3-48)$$

A partir de la définition de la matrice $[B]$ (3-22), nous aurons :

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \bar{Q}_{ij(p)} (z_p^2 - z_{p-1}^2) + \frac{1}{2} \bar{Q}_{ij(q)} (z_q^2 - z_{q-1}^2) \quad (3-49)$$

Par la substitution de l'équation (3-46) dans l'équation (3-49), nous obtenons :

$$B_{ij(p+q)} = \frac{1}{2} \bar{Q}_{ij(p)} [z_p^2 - z_{p-1}^2 + z_{p-1}^2 - z_p^2] = 0 \quad (3-50)$$

Ainsi, la contribution de n'importe quelle deux couches est nulle pour tous les termes B_{ij} .

Donc, la matrice $[B]$ est nulle pour un stratifié symétrique. Par contre, la contribution des termes A_{ij} et D_{ij} pour deux couches symétriques est non nulle c'est-à-dire :

$$A_{ij(p+q)} = 2\bar{Q}_{ij} (z_p - z_{p-1}) = 2\bar{Q}_{ij} (t_p) \neq 0 \quad (3-51)$$

$$D_{ij(p+q)} = \frac{2}{3} \bar{Q}_{ij} (z_p^3 - z_{p-1}^3) \neq 0 \quad (3-52)$$

Où : t_p est l'épaisseur de la couche p.

Les équations constitutives d'un stratifié symétriques sont :

$$\{N\} = [A] \{\varepsilon^0\} \quad (3-53)$$

$$\{M\} = [D]\{k\} \quad (3-54)$$

II. 3. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synoptique sur les matériaux composites. On s'est intéressé à ceux résultant de l'assemblage d'une matrice et d'un renfort se présentant sous forme de fibres. Cette présentation montre les caractères avantageux de ces matériaux à savoir légèreté et une grande résistance à la traction. Le plus souvent, les matériaux composites se présentent sous forme d'un empilement de couches donnant lieu à un stratifié, pour cela nous avons donc exposé dans ce chapitre les relations qui existent entre les composantes de déformation et celles de déplacement qui nous ont permis l'obtention de l'équation fondamentale de la théorie des stratifiés. A partir de cette dernière équation et en exprimant les forces et les moments par unité de longueur, les matrices de membrane, de flexion et de couplage ont été déterminées. Comme ce stratifié va être appliqué à la face de tension inférieure d'une poutre en béton dans le but de la renforcer, il est impératif d'étudier la zone de contact béton – composite appelée interface. Une investigation sur les différentes méthodes de renforcement et de réparation des poutres en béton armé par collage de matériaux composite et les théories de calcul des contraintes d'interface issues de la littérature ont été présentées en chapitre 2. En se basant sur la théorie des stratifiés exposée dans ce chapitre et l'approche de la compatibilité des déformations une nouvelle approche pour le calcul des contraintes au niveau de l'interface sera présentée dans ce qui suit .

Chapitre 3 :

Modélisation des contraintes d'interface dans les poutres continues en béton armé

III. Modélisation des contraintes d'interface dans les poutres continues en béton armé

III. 1. Introduction :

La réhabilitation des ouvrages en béton armé au moyens des matériaux composites est une nouvelle technique se présente comme une solution efficace pour parer plusieurs phénomènes naturels, l'utilisation des matériaux composites dans la réparation des ouvrages en génie civil est une solution prometteuse et efficace par leurs excellentes propriétés telles que légèreté, résistance, durabilité, cependant le mode de rupture le plus important de ces éléments renforcés est le décollement de la plaques composites en raison des contraintes d'interfaces élevées à la proximité du bord de la plaque collée. Plusieurs solutions ont été développées dans cette décennie pour estimer l'intensité des contraintes d'interface dans les poutres renforcées par des plaques en acier ou des plaques composites. Toutes ces solutions sont données pour un comportement élastique linéaire des matériaux et sont sur une hypothèse que la couche d'adhésif est soumise à une réparation linéaire des contraintes normales et de cisaillement à travers son épaisseur. C'est cette supposition qui permet d'obtenir une solution relativement simple, Tounsi (2006) a présenté un modèle théorique simple pour la détermination des contraintes d'interface.

Dans ce chapitre, nous avons montré l'influence des caractéristiques géométriques et des propriétés mécaniques d'une poutre continue en béton armé sur l'évolution des contraintes d'interface composite-béton. Une méthode améliorée pour le calcul des contraintes d'interface a été présentée. La propriétés mécaniques des matériaux composites a été prise en compte dans l'analyse théorique en supposant une répartition linéaire des contraintes à travers l'épaisseur de la couche d'adhésive. Nous avons remarqué à travers les résultats obtenus que les contraintes d'interface maximales calculées par la présente méthode coïncident parfaitement avec ceux issus de la littérature.

III. 2. Comportement mécanique d'une section de poutre en béton armé renforcée

La technique du collage est le procédé de référence pour fixer les matériaux composites sur un support béton. Elle permet une diffusion répartie de l'effort et nécessite des moyens de mise en œuvre légers. Néanmoins, si les techniques de fixation par collage sont largement acceptées dans l'industrie aéronautique ou automobile, elles peinent à s'imposer dans le monde du génie civil plus habitué à des connexions mécaniques par clouage ou vissage. La

technique de fixation des renforts en matériaux composites par collage se révèle donc être une technique efficace. Néanmoins on constate que la ruine des systèmes collés survient majoritairement par décollement des composites, et peut alors induire une rupture de type fragile. Or la rupture fragile d'un élément structural est un événement à éviter, notamment dans le cas d'un renforcement parasismique, où la ductilité de l'élément est primordiale puisque dissipative de l'énergie sollicitant. Ainsi, optimiser le renforcement par matériaux composites collés en incluant des systèmes d'ancrage peut s'avérer être une disposition constructive intéressante. En particulier, la jonction entre deux éléments constitue souvent une zone critique ; aussi, assurer une certaine continuité du système de renforcement entre les deux éléments.

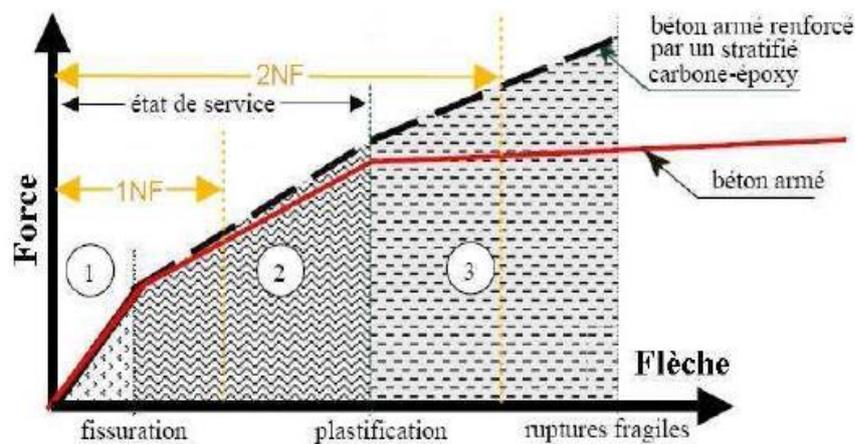


Figure III.1. Les trois phases de comportement d'une poutre en béton armé fléchie renforcée par un stratifié en composite.

1NF : 1^{er} niveau de pré fissuration ;

2NF : 2^{ème} niveau de pré fissuration lors des essais de pré fissuration.

Le comportement global d'une poutre en béton armé est divisé en trois phases principales, qu'elle soit renforcée par le collage du matériau composite ou non. Ce comportement est représenté schématiquement sur la Figure (III.1) et il correspond à la description suivante :

Une première phase linéaire élastique correspondant au comportement des poutres non fissurées, cette phase appelée "élastique".

Une deuxième phase linéaire correspondant au comportement de service des poutres fissurées.

Une troisième phase correspondant au comportement de la plastification de l'armature tendue constituant le renfort interne, cette phase sera appelée "plastique". La poutre en béton armé a alors une rigidité très faible. Par contre, la poutre renforcée

par composite continue à reprendre des efforts supplémentaires avec une rigidité proportionnelle à l'épaisseur de la plaque en composite ou au nombre de plis utilisés.

Le comportement structural d'une poutre renforcée dépend de l'interaction de chacune des sections de la figure (III.2).

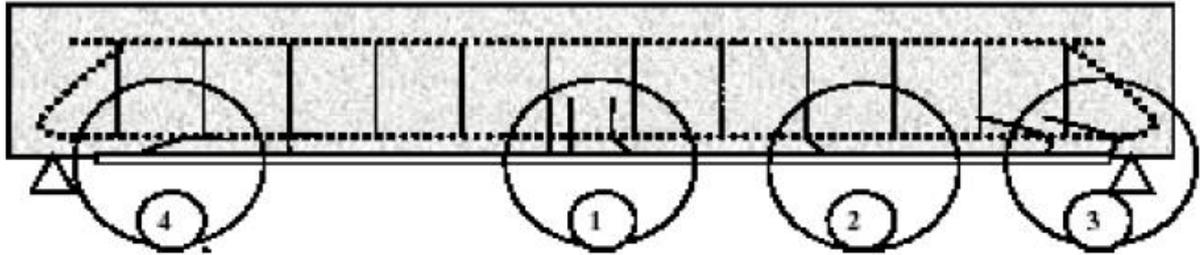


Figure III.2. comportement structural d'une poutre renforcée

Nous allons décrire plus en détail le comportement mécanique de chaque section (section centrale, intermédiaire et d'extrémité).

La section centrale (1) : Son équilibre dépend des longueurs d'ancrage. Dans cette zone l'adhérence entre le béton et le renfort est parfaite, et le film de colle ne reprend que des contraintes de cisaillement.

La section intermédiaire (2) : Dans cette section, les contraintes de cisaillement ne sont pas nulles. Deux paramètres peuvent alors modifier l'équilibre de la section: les caractéristiques mécaniques et géométriques du joint de colle (module et épaisseur) et l'intensité des contraintes. Pour la section, les conséquences des interactions de chacun des paramètres sont une perte d'efforts dans le composite. Cette perte d'effort implique alors une redistribution des efforts dans la section vers les aciers.

La section d'extrémités (3 et 4) : Cette section est soumise à un couple d'efforts défini par plusieurs chercheurs, ceux-ci ont mis en évidence la présence de sur-contrainte d'extrémité et l'existence d'une sur-contrainte normale localisée en extrémité de la plaque. La présence de ces sur-contraintes localisées a une influence notamment sur le mode de rupture. Deux cas peuvent se produire :

- le plan de collage n'est pas suffisamment résistant: la rupture se produit alors par décollement de la plaque composite ;
- le plan de collage est suffisamment résistant: dans ce cas, les contraintes normales et tangentielles créent une rupture dans le béton de l'enrobage.

III.3. Mécanisme de rupture sous chargement de flexion d'une poutre en béton armé renforcé par composite

Dans le cas de poutres renforcées sous sollicitation de flexion, quatre modes de rupture sont présentés (figure III.3 et III.4): la rupture due à la flexion, celle due à l'effort tranchant, celle due au décollement de la plaque en composite et celle à la rupture de l'enrobage du béton. Parmi celles-ci, le décollement de la plaque composite et la rupture de l'enrobage du béton sont prématurés et souvent brutaux.

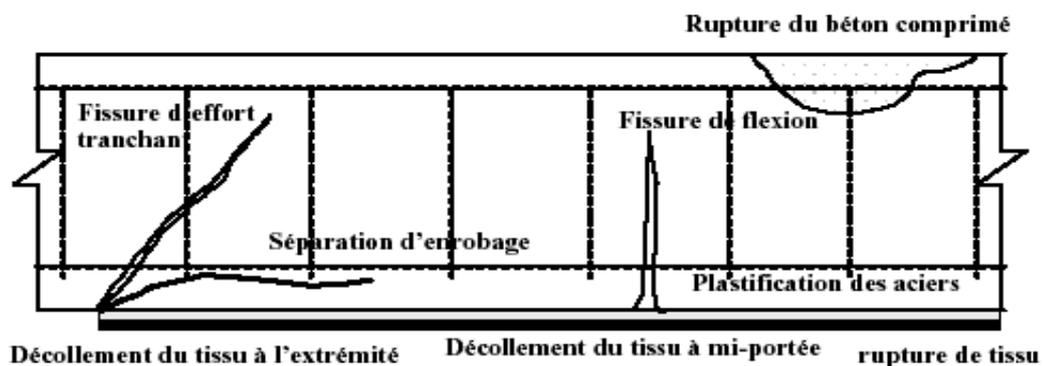


Figure III.3. Modes de rupture des poutres renforcées de matériaux composites.

La rupture en flexion des poutres renforcées est provoquée soit par la ruine du béton comprimé, soit par l'importante plastification des armatures tendues, soit par la rupture en tension du composite. Le premier cas se produit brutalement lorsque les poutres sont fortement armées ; elles sont renforcées soit par trop d'armatures, soit par trop de plaque composite. En revanche, les deuxième et troisième cas concernent des poutres faiblement ou moyennement armées. Lors du dimensionnement des éléments, c'est la rupture par plastification des armatures qui est visée.

La rupture de poutres renforcées due à l'effort tranchant se produit lorsque la résistance à l'effort tranchant des poutres sans renforcement est insuffisante. Les fissures apparaissent d'abord à partir des extrémités du composite longitudinales et sont inclinées vers le centre des sections droites de la poutre. Ce phénomène est dû à la concentration de contrainte provenant de la non continuité du composite.

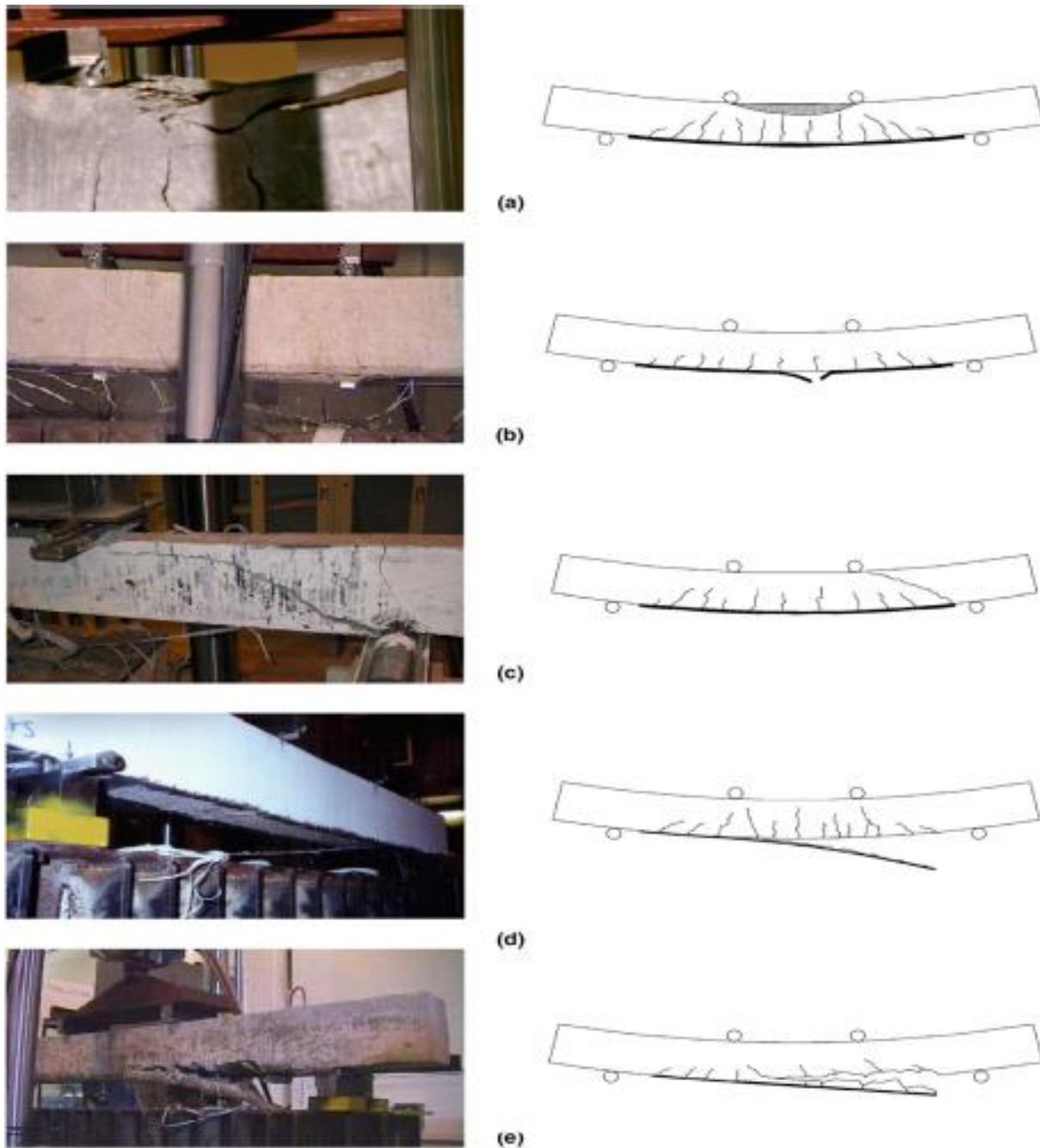


Figure III.4. Différents modes de rupture des poutres en béton armé renforcées par composite

- (a) rupture du béton comprimé ; (b) rupture du composite ; (c) fissure de l'effort tranchant
 (d) décollement du composite à l'extrémité ; (e) rupture de l'enrobage du béton

La rupture de poutres renforcées due à la rupture de l'enrobage de béton ou délaminage du composite provient de la concentration de contrainte de cisaillement dans la couche de la colle (la couche du béton de l'enrobage). La résistance à la contrainte de cisaillement de la colle est plus élevée que celle du béton, le décollement de la plaque composite se produit donc

toujours entre le béton et la colle. La rupture due à la séparation de l'enrobage ou délaminage du composite est nommé rupture due au décollement de la plaque composite.

Deux modes de rupture du décollement de la plaque composite ont été observées (d'après les résultats de la littérature): soit un décollement du composite débuté aux extrémités de la plaque composite, puis se propage vers le centre de la poutre; soit un décollement du composite se produit localement dans les endroits où le moment fléchissant est le plus important. Ce décollement du composite se propage éventuellement vers les extrémités de la plaque composite. Le premier mode de rupture provient de la concentration de contraintes à l'extrémité de la plaque composite. La deuxième forme de rupture provient de l'importante déformation du composite provoquée par la propagation de fissures dues à la combinaison des efforts tranchants et du moment fléchissant.

Le décollement aux extrémités de la plaque composite se produit habituellement lorsque trois conditions sont remplies:

- Une faible portée de l'effort tranchant, ce qui produit un cisaillement important et un décollement entre le composite et la poutre, situé proche des appuis ;
- Les extrémités de la plaque composite sont éloignées des appuis ;
- L'application de tissu raide empêchant la flèche et produisant une contrainte de cisaillement élevée près des extrémités de la plaque.

Egalement le décollement de la plaque composite à partir des extrémités se produit souvent sur des poutres ayant une faible résistance à l'effort tranchant. En revanche, le décollement à mi-portée se produit sous les conditions suivantes:

- Une portée importante de l'effort tranchant, un moment de flexion élevé qui se produit proche de la mi-portée;
- Les extrémités du composite sont très proches des appuis ;
- L'application de plaque composite mince.

III.4. Analyse des contraintes d'interface pour une poutre en béton armé renforcée par composite

Parmi les nouvelles techniques de construction, la réhabilitation des ouvrages existants au moyen des matériaux composites se présente comme une solution efficace pour parer à

certains phénomènes naturels, l'utilisation des matériaux composites dans la réparation des ouvrages en génie civil est devenue une solution prometteuse et efficace. Par leurs excellentes propriétés telles que légèreté, résistance, durabilité et un aspect non corrosif, les matériaux composites ont totalement remplacés les plaques en acier utilisées antérieurement comme moyen de renforcement. Cependant, le mode de rupture le plus important de ces éléments renforcés est le décollement de la plaque composite en raison des contraintes d'interfaces élevées à la proximité du bord de la plaque collée. Des prédictions exactes de telles contraintes sont donc nécessaires pour prévoir ce mode de ruine. Plusieurs solutions ont été développées dans cette dernière décennie pour estimer l'intensité des contraintes d'interface dans les poutres renforcées par des plaques en acier ou des plaques composites parmi eux Tounsi (2006), Hassaine Daouadji (2016), Rabahi (2019), Benferhat (2018) et Smith (2002). Toutes ces solutions sont données pour un comportement élastique linéaire des matériaux et sont fondées sur une hypothèse clé qui stipule que la couche d'adhésif est soumise à une répartition linéaire des contraintes normales et de cisaillement à travers son épaisseur. C'est cette supposition qui permet d'obtenir une solution relativement simple.

A ce titre, une solution générale a été développée pour prédire les contraintes d'interfaces de cisaillement et normale, pour une poutre continue en béton armé renforcée par collage externe de plaque en matériau composite.

III.4.1. Hypothèse 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 :

Tous les matériaux étudiés ont un comportement élastique et linéaire.

La poutre est simplement appuyée et obéit à la loi de Navier –Bernoulli c'est-à-dire qu'après déformation longitudinale de la poutre, la section plane reste plane et identique à elle-même.

Aucun glissement n'est permis entre les interfaces (c'est-à-dire qu'il y a un lien parfait entre face inférieure de la poutre-adhésif- plaque composite).

Les déformations, dues à la flexion, de l'adhésif sont négligées.

On suppose que la couche adhésive est mince de sorte que les efforts puissent être considérés comme constants à travers l'épaisseur de la couche.

La rigidité à la flexion de la poutre à renforcer est beaucoup plus grande que la rigidité de la plaque de composite.

III.4.2. Schéma statique de la poutre:

Un élément dx de la poutre renforcée figure (III.6) est représenté dans la figure (III.7 et III.8). Elle montre d'une part, les contraintes de cisaillement $\tau(x)$ et les contraintes normales d'interface $\sigma(x)$; d'autre part, elle indique la convention de signe utilisé pour le moment de flexion, l'effort tranchant, l'effort normal et le chargement appliqué.

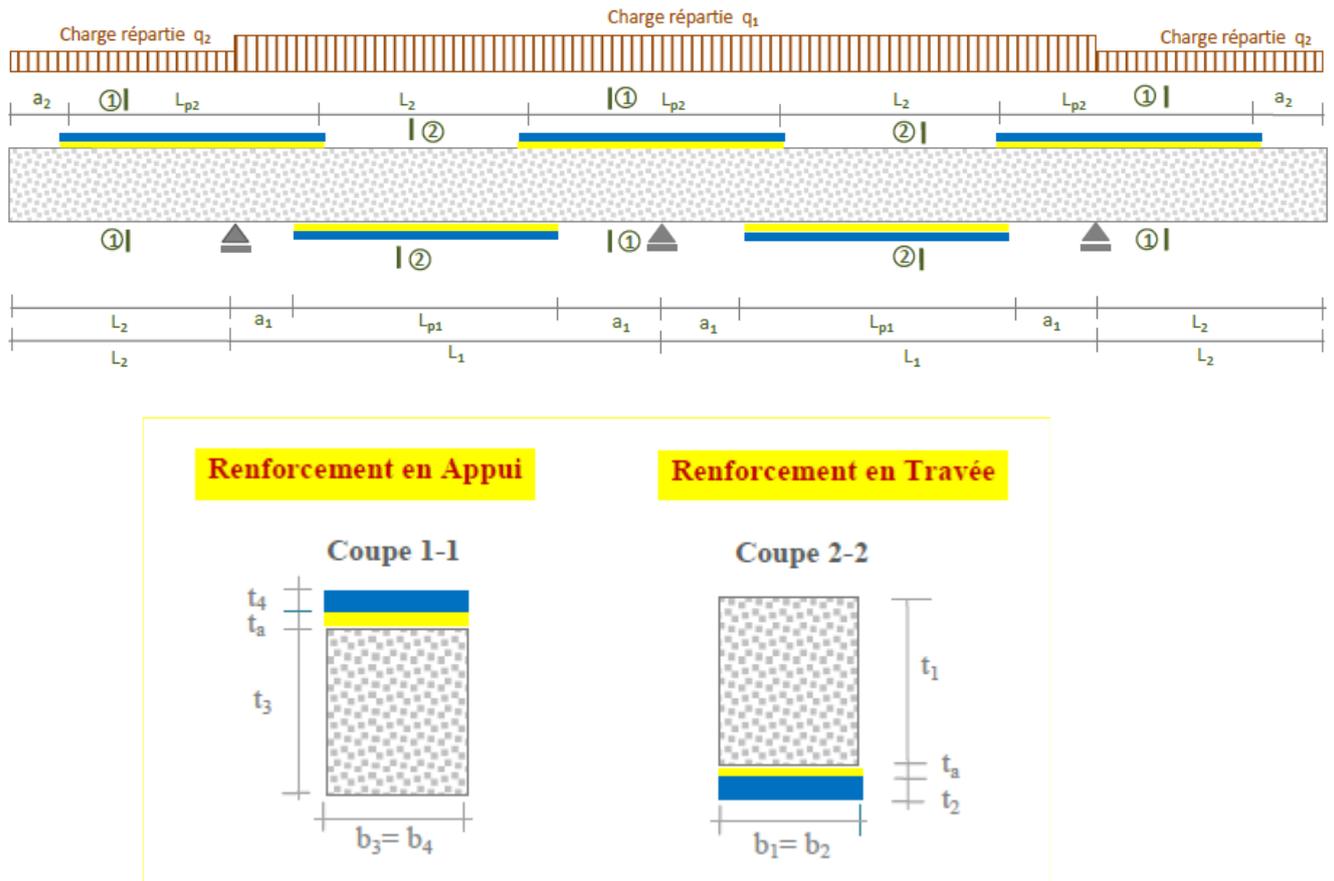


Figure III.6. Poutre continue en béton armé renforcée par collage des plaques en composite.

Dans cette analyse, un comportement élastique linéaire est supposé pour les trois matériaux (béton, l'adhésif et la plaque composite). La couche d'adhésive est supposée jouer un rôle de transfert des contraintes du béton à la plaque composite avec des contraintes constantes à travers toute son épaisseur.

III.4.2.1. Renforcement en travée:

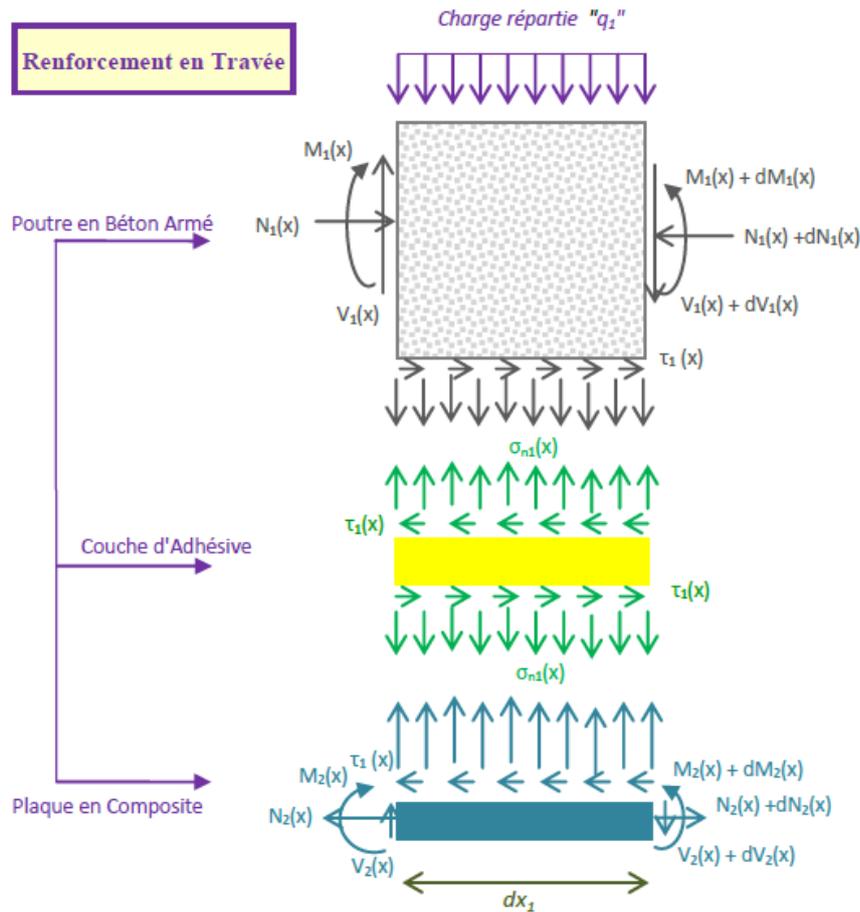


Figure III.7. Forces dans un élément infinitésimal d'une poutre continue en béton armé renforcée par collage des plaques en composite: renforcement en travée.

Equations d'élasticité

La déformation $\varepsilon_1(x)$ dans le béton au voisinage de la couche d'adhésive peut être exprimé par :

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{e}{E_1 I_1} M_1(x) - \frac{N_1}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{4G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \tag{1}$$

En se basant sur la théorie des plaques stratifiés, la déformation $\varepsilon_2(x)$ de la plaque composite au voisinage de la couche d'adhésive est donnée par :

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = A_{11} \frac{N_2(x)}{b_2} - D_{11} \frac{t_2}{2b_2} M_2(x) \tag{2}$$

Où $u_1(x)$ et $u_2(x)$ sont les déplacements horizontaux de la poutre en béton et la plaque composite respectivement. $M_1(x)$ et $M_2(x)$ sont respectivement les moments de flexion

appliqués à la poutre en béton et la plaque composite ; E_1 est le module de Young du béton ; I_1 le moment d'inertie, e est la distance entre l'axe neutre à la fibre inférieure du béton, N_1 et N_2 sont les forces axiales appliquées au béton et à la plaque composite respectivement, b_2 et t_2 sont la largeur et l'épaisseur de la plaque de renforcement, $[A']=[A-1]$ est l'inverse de la matrice de membrane $[A]$, $[D']=[D-1]$ est l'inverse de la matrice de flexion.

En écrivant les conditions d'équilibre de l'adhérant 1 (béton), nous aurons :

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

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

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

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

Le moment d'équilibre :

$$\frac{dM_1}{dx} = V_1(x) - \tau(x)b_2e \quad (5)$$

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

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

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

$$\text{Le moment d'équilibre: } \frac{dM_2}{dx} = V_2(x) - \tau(x)b_2 \frac{t_2}{2} \quad (8)$$

Où $V_2(x)$ est l'effort tranchant de la plaque de renforcement.

La distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite – Béton

On considère dans ce qui suit, la rigidité de la plaque de renforcement est nettement inférieure à celle de la poutre en béton à renforcer. Le moment de flexion dans la plaque

composite peut être négligé pour simplifier les opérations de dérivation de la contrainte de cisaillement.

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

$$\tau(x) = K_s \Delta u(x) = K_s [u_2(x) - u_1(x)] \quad (9)$$

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

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

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

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

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \left[\left(A_{11}' \frac{N_2(x)}{b_2} - D_{11}' \frac{t_2}{2b_2} M_2(x) \right) - \left(\frac{e}{E_1 I_1} M_1(x) - \frac{N_1}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{4G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \right) \right] \quad (11)$$

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

$$M_1(x) = R M_2(x) \quad (12)$$

Avec :

$$R = \frac{E_1 I_1 D_{11}'}{b_2} \quad (13)$$

Le moment total d'équilibre de l'élément différentiel de la figure III.7 est donné par:

$$M_T(x) = M_1(x) + M_2(x) + N(x) \left(e + t_a + \frac{t_2}{2} \right) \quad (14)$$

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

$$N(x) = N_1(x) = N_2(x) = b_2 \int_0^x \tau(x) dx \quad (15)$$

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

$$M_1(x) = \frac{R}{R+1} \left[M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x) \left(e + t_a + \frac{t_2}{2} \right) dx \right] \quad (16)$$

$$M_2(x) = \frac{1}{R+1} \left[M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x) \left(e + t_a + \frac{t_2}{2} \right) dx \right] \quad (17)$$

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

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = \frac{R}{R+1} \left[V_T(x) - b_2 \tau(x) \left(e + t_a + \frac{t_2}{2} \right) \right] \quad (18)$$

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = \frac{R}{R+1} \left[V_T(x) - b_2 \tau(x) \left(e + t_a + \frac{t_2}{2} \right) \right] \quad (19)$$

En différentiant l'équation (11) nous aurons :

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} = K_s \left[\frac{A'_{11}}{b_2} \frac{dN_2(x)}{dx} - D'_{11} \frac{t_2}{2b_2} \frac{dM_2(x)}{dx} - \frac{e}{E_1 I_1} \frac{dM_1(x)}{dx} + \frac{1}{E_1 A_1} \frac{dN_1(x)}{dx} - \frac{t_1}{4G_1} \frac{d^2 \tau_a}{dx^2} \right] \quad (20)$$

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

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} - K_1 \left(A'_{11} + \frac{b_2}{E_1 A_1} + \frac{(e+t_2/2)(e+t_a+t_2/2)}{E_1 I_1 D'_{11} + b_2} b_2 D'_{11} \right) \tau(x) + K_1 \left(\frac{(e+t_2/2)}{E_1 I_1 D'_{11} + b_2} D'_{11} \right) V_T(x) = 0 \quad (21)$$

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

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

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 V_T(x) \quad (23)$$

Avec :

$$\lambda^2 = K_1 \left(A'_{11} + \frac{b_2}{E_1 A_1} + \frac{(e+t_2/2)(e+t_a+t_2/2)}{E_1 I_1 D'_{11} + b_2} b_2 D'_{11} \right) \quad (24a)$$

$$m_1 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left(\frac{(e + t_2/2)}{E_1 I_1 D'_{11} + b_2} D'_{11} \right) \quad (24b)$$

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

La contrainte de cisaillement pour une charge uniformément répartie :

$$\tau(x) = \left[\frac{eK_1}{E_1 I_1} \frac{a_1}{2} (L_1 - a_1) - m_1 \right] \frac{q_1 e^{-\lambda x}}{\lambda} + m_1 q_1 \left(\frac{L_1}{2} - a_1 - x \right) \quad 0 \leq x \leq L_{p1} \quad (25)$$

Où q_1 est la charge uniformément répartie. x, a_1, L et L_{p2} sont définies par la (figure III.6).

La distribution des contraintes normales dans l'interface composite – béton

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

$$\sigma_n(x) = K_n \Delta w(x) = K_n [w_2(x) - w_1(x)] \quad (26)$$

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

$$K_n = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)} = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)/t_a} \left(\frac{1}{t_a} \right) = \frac{E_a}{t_a} \quad (27)$$

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

En dérivant l'équation (26) deux fois il en résulte :

$$\frac{d^2 \sigma_n(x)}{dx^2} = K_n \left[\frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} - \frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} \right] \quad (28)$$

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

$$\frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} = -\frac{M_1(x)}{E_1 I_1}, \quad \frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} = -\frac{D'_{11} M_2(x)}{E_2 I_2} \quad (29)$$

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

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

$$\text{Adhérent 1 : } \frac{d^4 w_1(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_1 I_1} b_2 \sigma_n(x) + \frac{e}{E_1 I_1} b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_1 I_1} \quad (30)$$

$$\text{Adhérent 2 : } \frac{d^4 w_2(x)}{dx^4} = -D_{11}' \sigma_n(x) + D_{11}' \frac{t_2}{2} \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (31)$$

La substitution des équations (30) et (31) dans la quatrième dérivée de la contrainte normale obtenue à partir de l'équation (26) donne l'équation différentielle régissant la contrainte normale d'interface :

$$\frac{d^4 \sigma_n(x)}{dx^4} + K_n \left(D_{11}' + \frac{b_2}{E_1 I_1} \right) \sigma_n(x) - K_n \left(D_{11}' \frac{t_2}{2} - \frac{e b_2}{E_1 I_1} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q K_n}{E_1 I_1} = 0 \quad (32)$$

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

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q_1 \quad (33)$$

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 :

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q_1 \quad (34)$$

Ou :

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_n}{4} \left(D_{11}' + \frac{b_2}{E_1 I_1} \right)} \quad (35)$$

$$n_1 = \left(\frac{e b_2 - D_{11}' E_1 I_1 t_2 / 2}{D_{11}' E_1 I_1 + b_2} \right) \quad (36)$$

$$n_2 = \frac{1}{D_{11}' E_1 I_1 + b_2} \quad (37)$$

Les constantes d'intégration C_1 et C_2 sont déterminé à partir des conditions initiales.

Les constantes d'intégration C_1 et C_2 sont données par :

$$C_1 = \frac{K_n}{2\beta^3 E_1 I_1} [V_T(0) + \beta M_T(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left(\frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \quad (38)$$

$$C_2 = -\frac{K_n}{2\beta^2 E_1 I_1} M_T(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad (39)$$

Ou :

$$n_3 = b_2 K_n \left(\frac{e}{E_1 I_1} - \frac{D_{11} t_2}{2b_2} \right) \quad (40)$$

III.4.2.2. Renforcement en appui:

Equations d'élasticité:

La déformation $\varepsilon_3(x)$ dans le béton au voisinage de la couche d'adhésive peut être exprimé par:

$$\varepsilon_3(x) = \frac{du_3(x)}{dx} = y_3 \frac{d^3 u_3(x)}{dx^3} + \frac{N_3(x)}{E_3 A_3} = \frac{du_3}{dx} = \frac{y_3}{E_3 I_3} M_3(x) + \frac{N_3(x)}{E_3 A_3} \quad (41)$$

basant sur la théorie des plaques stratifiés, la déformation $\varepsilon_4(x)$ de la plaque composite au voisinage de la couche d'adhésive est donnée par :

$$\varepsilon_4(x) = \frac{du_4(x)}{dx} = -D_{11} \frac{y_4}{b_4} M_4(x) + A_{11} \frac{N_4(x)}{b_4} \quad (42)$$

Où $u_3(x)$ et $u_4(x)$ sont les déplacements horizontaux de la poutre en béton armé et la plaque composite respectivement. $M_3(x)$ et $M_4(x)$ sont respectivement les moments de flexion appliqués à la poutre en en béton armé et la plaque composite ; E_3 est le module de Young du béton armé ; I_3 le moment d'inertie, y_3 est la distance entre l'axe neutre à la fibre inférieure du béton armé, N_3 et N_4 sont les forces axiales appliquées à l'acier et à la plaque composite respectivement, b_4 et t_4 sont la largeur et l'épaisseur de la plaque de renforcement, $[A']=[A^{-1}]$ est l'inverse de la matrice de membrane $[A]$, $[D']=[D^{-1}]$ est l'inverse de la matrice de flexion.

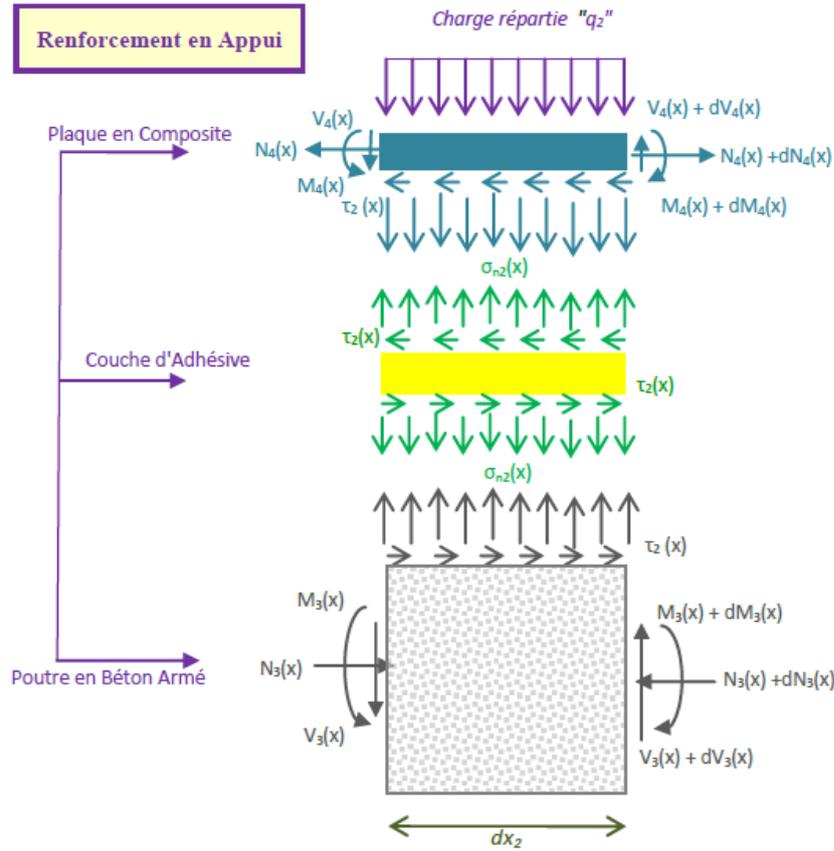


Figure III.8. Forces dans un élément infinitésimal d'une poutre continue en béton armé renforcée par collage des plaques en composite: renforcement en appui.

En écrivant les conditions d'équilibre de l'adhérant 1 (en béton armé), nous aurons directionx:

$$\frac{dN_3(x)}{dx} = -b_4 \tau(x) \tag{43}$$

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

Dans la direction y :

$$\frac{dV_3}{dx} = -[\sigma_n(x)b_4 + qb_3] \tag{44}$$

$V_3(x)$ est l'effort tranchant de l'adhérant 3.

$\sigma(x)$ est la contrainte normale au niveau de la couche d'adhésive, q est la charge répartie et b_3 la largeur de l'adhérant 3.

moment d'équilibre :

$$\frac{dM_3}{dx} = V_3(x) - \tau(x)b_4 \cdot y_3 \quad (45)$$

L'équilibre de la plaque de renforcement dans les directions x et y, ainsi que le moment de l'équilibre sont écrits comme suit:

Direction x:

$$\frac{dN_4(x)}{dx} = b_4 \tau(x) \quad (46)$$

Direction y:

$$\frac{dV_3}{dx} = \sigma_n(x)b_4 \quad (47)$$

Le moment d'équilibre:

$$\frac{dM_4}{dx} = V_4(x) - \tau(x)b_4 \cdot y_4 \quad (48)$$

$V_4(x)$ est l'effort tranchant de l'adhérent 4.

Distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite – Béton

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

La contrainte de cisaillement au niveau de la couche d'adhésive peut être exprimée comme suit: $\tau(x) = K_s \Delta u(x) = K_s [u_4(x) - u_3(x)]$ (49)

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

$$K_s = \frac{\tau(x)}{\Delta u(x)} = \frac{\tau(x)}{\Delta u(x)/t_a} \frac{1}{t_a} = \frac{G_a}{t_a} \quad (50)$$

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

En différentiant les équations (49), (41) et (42) par rapport à x , et en négligeant le moment de flexion de la plaque composite nous aurons :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \left[\frac{du_4(x)}{dx} - \frac{du_3(x)}{dx} \right] \quad (51)$$

En substituant l'équation (41) et (42) dans (51) nous aurons

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \left[\left[-D_{11}' \frac{y_4}{b_4} M_4(x) + A_{11}' \frac{N_4(x)}{b_4} \right] - \left[-\frac{y_3}{E_3 I_3} M_3(x) + \frac{N_3}{E_3 A_3} \right] \right] \quad (52)$$

En supposant que les courbures dans l'adhérent 3 et 4 sont égales la relation entre le moment dans les deux adhérents peut être écrite comme suit :

$$M_3(x) = R M_4(x) \quad (53)$$

$$R = \frac{E_3 I_3 D_{11}'}{b_4} \quad (54)$$

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

$$M_T(x) = M_3(x) + M_4(x) + N(x)(y_3 + y_4 + t_a) \quad (55)$$

$M_T(x)$ est le moment total

$$N(x) = N_3(x) = N_4(x) = b_4 \int_0^x \tau(x) dx \quad (56)$$

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

$$M_3(x) = \frac{R}{R+1} \left[M_T(x) - b_4 \int_0^x \tau(x)(y_3 + y_4 + t_a) dx \right] \quad (57)$$

$$M_4(x) = \frac{1}{R+1} \left[M_T(x) - b_4 \int_0^x \tau(x)(y_3 + y_4 + t_a) dx \right] \quad (58)$$

En dérivant les expressions (57) et (58) nous aurons :

$$\frac{dM_3(x)}{dx} = \frac{R}{(R+1)} [V_T(x) - b_4 \tau(x)(y_3 + y_4 + t_a)] \quad (59)$$

$$\frac{dM_4(x)}{dx} = \frac{1}{(R+1)} [V_T(x) - b_4 \tau(x)(y_3 + y_4 + t_a)] \quad (60)$$

En dérivant l'équation (52) nous aurons:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \left(\tau(x) \right) - k_s \left(A_{11} \tau'(x) + b_4 \frac{dN_4(x)}{dx} - D_{11} \right) \\ + \frac{dM_4(x)}{dx} - y_3 \frac{E_3 I_3}{E_3 I_3} \frac{dM_3(x)}{dx} + 1 \frac{E_3 I_3}{E_3 I_3} \frac{dN_3(x)}{dx} \\ \frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} = K_s \left(\frac{A_{11}}{b_2} \frac{dN_2(x)}{dx} - D_{11} \frac{t_2}{2b_2} \frac{dM_2(x)}{dx} - \frac{y_1}{E_1 I_1} \frac{dM_1(x)}{dx} + \frac{1}{E_1 A_1} \frac{dN_1(x)}{dx} - \frac{t_1}{4G_1} \frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} \right) \quad (61) \end{aligned}$$

La substitution de l'effort tranchant équations (59) et (60) et l'effort normal (équations (56) dans l'équation (61) nous permet d'obtenir l'équation différentielle suivante

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} - K_1 \left(A_{11}' + \frac{b_4}{E_3 A_3} + \frac{(y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + t_a)}{E_3 I_3 D_{11}' + b_4} b_4 D_{11}' \right) \tau(x) + K_1 \left(\frac{(y_3 + y_4)}{E_3 I_3 D_{11}' + b_4} D_{11}' \right) V_T(x) = 0 \quad (62)$$

Avec :

$$K_1 = \frac{1}{\left(\frac{t_a}{G_a} + \frac{t_1}{4G_1} \right)} \quad (63)$$

La solution de l'équation différentielle (équation (62) ci-dessus est donné par :

$$\tau(x) = B_3 \cosh(\lambda x) + B_4 \sinh(\lambda x) + m_3 V_T(x) \quad (63)$$

Avec :

$$\lambda^2 = K_1 \left(A_{11}' + \frac{b_4}{E_3 A_3} + \frac{(y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + t_a)}{E_3 I_3 D_{11}' + b_4} b_4 D_{11}' \right) \quad (64)$$

$$m_3 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left(\frac{(y_3 + y_4)}{E_3 I_3 D_{11}' + b_4} D_{11}' \right) \quad (65)$$

La contrainte de cisaillement pour une charge uniformément répartie :

$$\tau(x) = \left(2m_3 + \frac{K_s y_3}{E_3 I_3} a_2^2 \right) \frac{q}{2\lambda} e^{-\lambda x} + m_3 q_2 (a_2 + x) \quad (66)$$

Distribution des contraintes normales dans l'interface composite – Béton

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

$$\sigma_n(x) = K_n \Delta w(x) = K_n [w_4(x) - w_3(x)] \quad (67)$$

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

$$K_n = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)} = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x) / t_a} \left(\frac{1}{t_a} \right) = \frac{E_a}{t_a} \quad (68)$$

$w_3(x)$ et $w_4(x)$ sont les déplacements verticaux de l'adhérent 3 et 4 respectivement.

En dérivant l'équation (67) deux fois il en trouve :

$$\frac{d^2 \sigma_n(x)}{dx^2} = K_n \left[\frac{d^2 w_4(x)}{dx^2} - \frac{d^2 w_3(x)}{dx^2} \right] \quad (69)$$

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

$$\frac{d^2 w_3(x)}{dx^2} = -\frac{M_3(x)}{E_3 I_3}, \quad (70)$$

$$\frac{d^2 w_4(x)}{dx^2} = -\frac{D_{11}' M_4(x)}{E_4 I_4} \quad (71)$$

En se basant sur les équations d'équilibre (45) (48), les équations différentielles d'équilibre des adhérents 3 et 4 exprimées en fonction des contraintes de cisaillement et des contraintes normales sont données comme suit :

Adhérent 3 :

$$\frac{d^4 w_3(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_3 I_3} b_4 \sigma_n(x) + \frac{y_2}{E_3 I_3} b_4 \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_3 I_3} \quad (72)$$

Adhérent 4 :

$$\frac{d^4 w_4(x)}{dx^4} = -D_{11}' \sigma_n(x) + D_{11}' y_4 \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (73)$$

En dérivant l'équation(69) encore deux fois :

$$\frac{d^4 \sigma_n(x)}{dx^4} = K_n \left[\frac{d^4 w_4(x)}{dx^4} - \frac{d^4 w_4(x)}{dx^4} \right] \quad (74)$$

La substitution des équations (71) et (72) dans l'équation (67) on obtient

$$\frac{d^4 \sigma_n(x)}{dx^4} + K_n \left(D'_{11} + \frac{b_4}{E_3 I_3} \right) \sigma_n(x) - K_n \left(D'_{11} y_4 - \frac{y_3 b_4}{E_3 I_3} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{qK_n}{E_3 I_3} = 0 \quad (75)$$

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

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_5 \cos(\beta x) + C_6 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [C_7 \cos(\beta x) + C_8 \sin(\beta x)] - n_3 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_4 q_2 \quad (76)$$

Pour des larges valeurs de " x " on suppose que la contrainte normale tend vers zéro, et il en résulte $C_7 = C_8 = 0$. La solution générale devient

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_5 \cos(\beta x) + C_6 \sin(\beta x)] - n_3 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_4 q_2 \quad (77)$$

Où :

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_n}{4} \left(D'_{11} + \frac{b_4}{E_3 I_3} \right)} \quad (78)$$

$$n_3 = \left(\frac{y_3 b_4 - D'_{11} E_3 I_3 y_4}{D'_{11} E_3 I_3 + b_4} \right) \quad (79)$$

$$n_4 = \frac{1}{D'_{11} E_3 I_3 + b_4} \quad (80)$$

Les constantes d'intégration C_5 et C_6 sont données par

$$: C_5 = \frac{K_n}{2\beta^3 E_3 I_3} [V_T(0) + \beta M_T(0)] - \frac{n_5}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_3}{2\beta^3} \left(\frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \quad (81)$$

$$C_6 = -\frac{K_n}{2\beta^2 E_3 I_3} M_T(0) - \frac{n_3}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad (82)$$

Où

$$n_5 = b_4 K_n \left(\frac{y_3}{E_3 I_3} - \frac{D'_{11} y_4}{b_4} \right) \quad (83)$$

III.5. Conclusion

Une méthode simple, pour le calcul des contraintes d'interface d'une poutre continue en béton armé renforcée par une plaque composite sous chargement uniformément réparti, a été présentée. L'élément important de la présente analyse est la prise en considération des stratifiées composite où nous rencontrons le maximum des contraintes normales et de

Chapitre4 :

Présentation et interprétation des résultats

IV. Présentation et interprétation des résultats

IV.1. Introduction:

Le renforcement extérieur des poutres par des plaques composites est une méthode efficace pour augmenter sa durée de vie. Le collage d'une plaque dépend intimement de la résistance de la couche d'adhésive, qui doit être conçue pour avoir une résistance adéquate. La fiabilité d'une structure collée dépend des plusieurs facteurs. Parmi ces facteurs, on cite la conception, la conformité à des normes et règlements, les matériaux, les méthodes de fabrication et le mode de mise en œuvre des joints aussi bien que l'analyse précise de la résistance de la couche d'adhésive structural. Dans notre cas, nous présentons l'influence des divers paramètres sur les valeurs maximales des contraintes de cisaillement et des contraintes normales pour les poutres renforcées. Aussi 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 composites; nous citons l'influence de la rigidité de la plaque et l'épaisseur de la couche d'adhésive, la longueur non renforcée, le module d'élasticité de l'adhésif.

1. Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés:

Les caractéristiques mécaniques des matériaux ainsi que les autres paramètres utilisés sont rapportées sur le tableaux ci dessous:

Tableau IV.1 : Caractéristiques géométriques et propriétés mécaniques des matériaux.

Composantes	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Module de Young (MPa)	Coef de Poisson
Adhésif	$b_a=200 \text{ mm}$	$t_a = 2 \text{ mm}$	$E_a=4500$	0,35
Plaque GFRP	$b_2= b_4=200 \text{ mm}$	$t_2=t_4=4 \text{ mm}$	$E_2=E_4=5000$	0,28
Plaque CFRP	$b_2= b_4=200 \text{ mm}$	$t_2=t_4=4 \text{ mm}$	$E_2=E_4=1400$	0,28
Plaque Acier	$b_2= b_4=200 \text{ mm}$	$t_2=t_4=4 \text{ mm}$	$E_2=E_4=2000$	0,3
Poutre en Béton armé	$b_1= b_3=200 \text{ mm}$	$t_1=t_3=300 \text{ mm}$	$E_1=E_3=3000$	0,18

2. Schéma statique de la poutre renforcée:

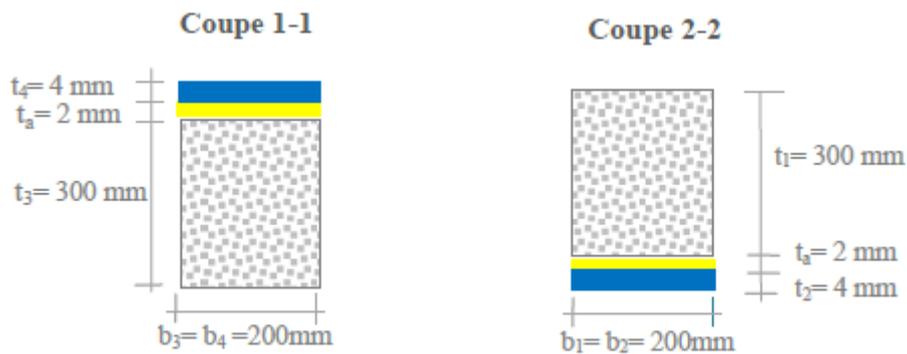
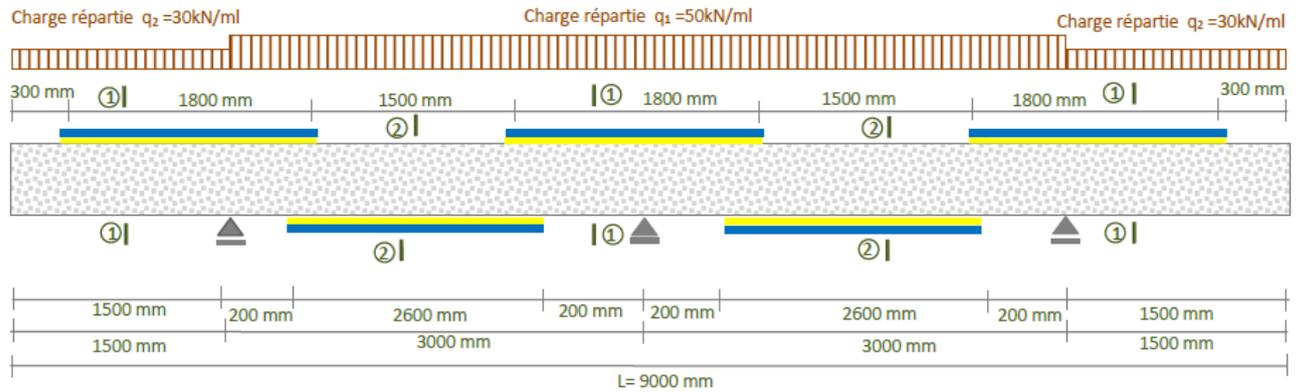


Figure IV .1. Caractéristique géométrique d'une poutre continue en béton armé renforcée par collage de matériau composite.

3. Vérification de la méthode

La présente méthode a été validée en comparant les résultats des contraintes d'interface avec ceux obtenus à partir de la méthode de Hassaine Daouadji (2016) et Xue-jun He (2019). Pour cela, une poutre en béton renforcée par une plaque en fibre de carbone (CFRP) est analysée, dont les caractéristiques géométriques sont présentées en figure IV.1 et les propriétés mécaniques sont rapportées sur le tableau IV.1. Les résultats obtenus, en utilisant la méthode développée en troisième chapitre ainsi que ceux de la présente méthode, pour les contraintes de cisaillement et contraintes normales d'interface, sont illustrés sur le Tableau IV .2. Les résultats obtenus et présentés laissent apparaître clairement, qu'une bonne concordance entre la présente méthode et celle développée par Hassaine Daouadji (2016) et Xue-jun He (2019) est observée. Les résultats des deux solutions se coïncident. Ceci démontre que les déformations de flexion et de cisaillement de la plaque de composite n'ont qu'un très léger

effet. Les deux solutions présentent des valeurs maximales (pic) au bord de la plaque puis diminuent rapidement pour atteindre la valeur zéro à mi travée.

Tableau IV .2. Comparaison des contraintes d'interface pour une poutre continue en béton armé renforcée par collage externe d'une plaque en CFRP

Poutre continue en béton armé renforcée <u>en travée</u> par une plaque en CFRP								
x(mm)	0	10	20	50	80	100	140	150
τ (MPa)	2.0481	1.8396	1.6365	0.9932	0.7547	0.5896	0.4251	0.3356
σ_n (MPa)	1.99	0.6231	0.108	0.0325	0.0083	-0.0069	-0.001	-0.00085
Poutre continue en béton armé renforcée <u>en appui</u> par une plaque en CFRP								
x(mm)	0	10	20	50	80	100		
τ (MPa)	1.6564	1.4052	1.1922	0.7388	0.5036	0.2941		
σ_n (MPa)	1.3793	0.4998	0.0864	0.0197	0.0054	-0.0089		

4. Etude paramétriques:

4. 1. Effet de la rigidité de la plaque composite :

Dans cette partie, nous présentons les résultats numériques de la présente méthode afin d'examiner l'efficacité des plaques (CFRP, GFRP et Acier) utiliser pour le renforcement des poutres poutre continue en béton armé. Les tableaux (IV.3 à IV.4) représentent les résultats de la variation des contraintes le long de l'interface béton-plaque de renforcement suivant la nature de la plaque. Ainsi ces résultats montrent que, quelque soit la nature du chargement les contraintes normales et de cisaillement sont plus élevées dans le cas de l'utilisation de la plaque en béton armé et basses dans le cas de l'utilisation de la plaque composite ; plus précisément la plaque composite GFRP qui a donné des valeurs de contraintes plus basse par rapport aux autres plaques.

Tableau IV .3. Effet de la rigidité de la plaque composite pour le renforcement en travée d'une poutre continue en béton armé

Poutre continue en béton armé renforcée <u>en travée</u> par une plaque en CFRP								
x(mm)	0	10	20	50	80	100	140	150
τ (MPa)	2.0481	1.8396	1.6365	0.9932	0.7547	0.5896	0.4251	0.3356
σ_n (MPa)	1.99	0.6231	0.108	0.0325	0.0083	-0.0069	-0.001	-0.00085
Poutre continue en béton armé renforcée <u>en travée</u> par une plaque en GFRP								
x(mm)	0	10	20	50	80	100	140	150
τ (MPa)	1.2001	0.8575	0.6355	0.3515	0.2863	0.0.1924	0.1447	0.1056
σ_n (MPa)	1.1024	0.5415	0.1832	0.0295	0.0094	-0.0078	-0.0083	-0.00094
Poutre continue en béton armé renforcée <u>en travée</u> par une plaque en Acier								
x(mm)	0	10	20	50	80	100	140	150
τ (MPa)	2.3402	1.8912	1.6535	1.0018	0.7569	0.6299	0.4750	0.3495
σ_n (MPa)	2.1224	0.8972	0.2223	0.0425	0.0032	-0.0052	-0.0159	-0.0059

Tableau IV .4. Effet de la rigidité de la plaque composite pour le renforcement en appui d'une poutre continue en béton armé

Poutre continue en béton armé renforcée <u>en appui</u> par une plaque en CFRP						
x(mm)	0	10	20	50	80	100
τ (MPa)	1.6564	1.4052	1.1922	0.7388	0.5036	0.2941
σ_n (MPa)	1.3793	0.4998	0.0864	0.0197	0.0054	-0.0089
Poutre continue en béton armé renforcée <u>en appui</u> par une plaque en CFRP						
x(mm)	0	10	20	50	80	100
τ (MPa)	1.0279	0.7664	0.5953	0.3680	0.1237	0.0791
σ_n (MPa)	0.8991	0.4010	0.1002	0.0084	0.0031	-0.0085
Poutre continue en béton armé renforcée <u>en appui</u> par une plaque en Acier						
x(mm)	0	10	20	50	80	100
τ (MPa)	2.0077	1.6817	1.5003	0.9771	0.6684	0.4633
σ_n (MPa)	1.8350	0.7480	0.1976	0.0550	0.0094	-0.0068

4. 2. Effet de l'épaisseur de la plaque composite

Tableau IV .5. Effet de l'épaisseur de la plaque composite pour le renforcement en travée

Effet de l'épaisseur de la plaque CFRP d'une poutre continue en béton armé renforcée en travée									
t_2 (mm)	x(mm)	0	10	20	50	80	100	140	150
2 mm	τ (MPa)	1.4100	1.1865	1.0089	0.5232	0.3996	0.2785	0.1997	0.1241
	σ_n (MPa)	1.1223	0.5623	0.0879	0.0154	0.0031	-0.0074	-0.0037	-0.00094
4 mm	τ (MPa)	2.0481	1.8396	1.6365	0.9932	0.7547	0.5896	0.4251	0.3356
	σ_n (MPa)	1.99	0.6231	0.108	0.0325	0.0083	-0.0069	-0.001	-0.00085
6 mm	τ (MPa)	2.3982	2.0082	1.7548	1.1264	0.8878	0.6711	0.4912	0.3882
	σ_n (MPa)	2.20	0.7664	0.1379	0.0498	0.0091	-0.0058	-0.0015	-0.00072
8 mm	τ (MPa)	2.6192	2.2234	2.0018	1.6205	1.0019	0.8945	0.6275	0.4663
	σ_n (MPa)	2.4056	0.8411	0.3926	0.0914	0.0763	-0.0038	-0.0012	-0.00060
10 mm	τ (MPa)	2.8525	2.3883	2.1256	1.7050	1.1080	0.9443	0.7555	0.5152
	σ_n (MPa)	2.5684	0.9947	0.5662	0.1765	0.0171	-0.0020	-0.0010	-0.0049

L'épaisseur de la plaque composite composites a permis de pouvoir effectuer des comparaisons des contraintes d'interfaces afin de déceler les meilleures combinaisons possibles suivant la variation des paramètres considérés. Ainsi les résultats sont illustrées sur les tableaux IV.5 et IV.6 pour mieux expliquer l'effet et surtout l'avantage de la présente méthode. Ces résultats montrent que les contraintes d'interfaces liées au stratifié ayant une épaisseur importante sont supérieures par rapport à celles liées au stratifié minces plus particulièrement les contraintes maximales. Ainsi la variation des contraintes d'interfaces est certainement due à celle de l'épaisseur du composite. Nous dire que l'augmentation des couches qui entraîne une augmentation de l'épaisseur du composite conduit également à une augmentation des contraintes d'interfaces.

Tableau IV .6. Effet de l'épaisseur de la plaque composite pour le renforcement en appui d'une poutre continue en béton armé

Effet de l'épaisseur de la plaque CFRP d'une poutre continue en béton armé renforcée en appui							
t_4 (mm)	x (mm)	0	10	20	50	80	100
2 mm	τ (MPa)	1.2400	0.9620	0.7207	0.4885	0.3354	0.1941
	σ_n (MPa)	0.8929	0.3388	0.0370	0.0098	0.0020	-0.0099
4 mm	τ (MPa)	1.6564	1.4052	1.1922	0.7388	0.5036	0.2941
	σ_n (MPa)	1.3793	0.4998	0.0864	0.0197	0.0054	-0.0076
6 mm	τ (MPa)	2.3982	2.0082	1.7548	1.1264	0.8878	0.6711
	σ_n (MPa)	2.20	0.7664	0.1379	0.0498	0.0091	-0.0058
8 mm	τ (MPa)	2.6192	2.2234	2.0018	1.6205	1.0019	0.8945
	σ_n (MPa)	2.4056	0.8411	0.3926	0.0914	0.0763	-0.0038
10 mm	τ (MPa)	2.8180	2.3550	2.0935	1.7336	1.0970	0.8991
	σ_n (MPa)	2.4484	0.8165	0.6001	0.0810	0.0145	-0.0042

4. 3. Effet de la longueur non renforcée "a" (distance de l'appui au bord de la plaque de renforcement):

L'influence de la longueur non renforcée « a » (longueur entre le bord de la plaque et le support) sur les contraintes les contraintes d'interface maximales est présentées sur les tableaux (IVI.7 et IV.8). On constate que, plus la longueur « a » augmente (c'est à dire la longueur de la plaque L_P diminue) plus les contraintes d'interface maximales (contraintes au bord de la plaque) s'accroissent d'une façon significative. Ces résultats démontrent que, quelque soit le cas de renforcement, 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.

Tableau IV .7. Effet de la longueur non renforcée pour le renforcement en travée d'une poutre continue en béton armé

Effet de l'épaisseur de la distance "a" d'une poutre continue en béton armé renforcée <u>en</u> <u>travée</u>									
a ₁ (mm)	X (mm)	0	10	20	50	80	100	140	150
50 mm	τ(MPa)	1.2235	0.9927	0.8547	0.5165	0.3996	0.2896	0.2350	0.1977
	σ _n (MPa)	1.1377	0.1257	0.0189	0.0097	0.0025	-0.0034	-0.0058	-0.0073
100 mm	τ(MPa)	1.6571	1.2338	1.0013	0.6544	0.4725	0.3962	0.2943	0.2110
	σ _n (MPa)	1.5176	0.5045	0.0265	0.0188	0.0044	-0.0023	-0.0041	-0.0062
150 mm	τ(MPa)	1.7378	1.5610	1.1933	0.7985	0.5137	0.4349	0.3486	0.2520
	σ _n (MPa)	1.6455	0.4329	0.0514	0.0197	0.0062	-0.0020	-0.0051	-0.0059
200 mm	τ(MPa)	1.8274	1.6610	1.2730	0.7864	0.5210	0.4539	0.3522	0.2771
	σ _n (MPa)	1.7046	0.5631	0.0802	0.0202	0.0075	-0.0156	-0.0040	-0.0049
300 mm	τ(MPa)	2.0481	1.8396	1.6365	0.9932	0.7547	0.8596	0.4251	0.3356
	σ _n (MPa)	1.99	0.6231	0.1088	0.0325	0.0083	-0.0069	-0.0019	-0.00085

Tableau IV .8. Effet de la longueur non renforcée pour le renforcement en appui d'une poutre continue en béton armé

Effet de l'épaisseur de la distance "a" d'une poutre continue en béton armé renforcée <u>en</u> <u>appui</u>							
a ₂ (mm)	x(mm)	0	10	20	50	80	100
50 mm	τ(MPa)	0.4376	0.3850	0.2667	0.1880	0.1374	0.1005
	σ _n (MPa)	0.3505	0.1007	0.0065	0.0018	0.0005	-0.0004
100 mm	τ(MPa)	0.5227	0.4738	0.3370	0.2248	0.1886	0.1339
	σ _n (MPa)	0.4066	0.1985	0.0088	0.0030	0.0007	-0.0003
150 mm	τ(MPa)	0.6045	0.5189	0.3806	0.2947	0.2035	0.1580
	σ _n (MPa)	0.5157	0.2350	0.0100	0.0041	0.0009	-0.0002
200 mm	τ(MPa)	0.7650	0.6320	0.4998	0.3777	0.2807	0.1901
	σ _n (MPa)	0.6040	0.3284	0.0223	0.0059	0.0018	-0.0001
300 mm	τ(MPa)	1.0080	0.8314	0.7028	0.6023	0.4136	0.2203
	σ _n (MPa)	0.8156	0.3722	0.0486	0.0071	0.0025	-0.0091

4. 4. Effet de l'épaisseur de la colle (couche d'adhésive):

L'effet de l'épaisseur de la couche d'adhésif sur la variation des contraintes d'interface est représenté sur les tableaux (IV.9 à IV.10). 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.

Tableau IV .9. Effet de l'épaisseur de la colle pour le renforcement en travée d'une poutre continue en béton armé

Effet de l'épaisseur de la colle d'une poutre continue en béton armé renforcée <u>en travée</u>									
t_a (mm)	x (mm)	0	10	20	50	80	100	140	150
2 mm	τ (MPa)	2.0481	1.8396	1.6365	0.9932	0.7547	0.5896	0.4251	0.3356
	σ_n (MPa)	1.99	0.6231	0.1088	0.0325	0.0083	-0.0069	-0.0019	-0.00085
4 mm	τ (MPa)	1.8439	1.5422	1.3336	0.8556	0.6664	0.4548	0.3110	0.1975
	σ_n (MPa)	1.5229	0.4225	0.0960	0.0234	0.0068	-0.0082	-0.0032	-0.0009
6 mm	τ (MPa)	1.5928	1.4250	1.2787	0.7922	0.5638	0.3999	0.2663	0.1664
	σ_n (MPa)	1.3001	0.3944	0.0520	0.0140	0.0029	-0.0090	-0.0009	-0.00098

Tableau IV .10. Effet de l'épaisseur de la colle pour le renforcement en appui d'une poutre continue en béton armé

Effet de l'épaisseur de la colle d'une poutre continue en béton armé renforcée <u>en appui</u>							
t_a (mm)	x (mm)	0	10	20	50	80	100
2 mm	τ (MPa)	1.6264	1.4052	1.1922	0.7388	0.5036	0.2941
	σ_n (MPa)	1.3793	0.4998	0.0864	0.0197	0.0054	-0.0076
4 mm	τ (MPa)	1.2982	1.1884	0.8810	0.6534	0.4224	0.2407
	σ_n (MPa)	1.1605	0.4085	0.0617	0.0082	0.0041	-0.0089
6 mm	τ (MPa)	0.9109	0.7766	0.6184	0.5023	0.3459	0.2010
	σ_n (MPa)	0.7184	0.3265	0.0215	0.0059	0.0013	-0.0097

4. 5. Effet de l'orientation des fibres θ° :

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

Les tableaux (IV.11 et IV.12) montrent que les contraintes d'interfaces maximales diminuent au fur et à mesure que l'angle d'orientation des fibres θ augmente. Ainsi la variation des contraintes est due à l'angle d'orientation. ces résultats montrent également une variation des contraintes d'interfaces en fonction des angles mais néanmoins même si le positionnement ainsi que l'orientation sont différents les contraintes d'interfaces restent les mêmes pour des angles d'orientation de signes contraires.

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

Tableau IV .11. Effet de l'orientation des fibres pour le renforcement en travée d'une poutre continue en béton armé

Effet de l'orientation des fibres d'une poutre continue en béton armé renforcée en travée									
θ°	x(mm)	0	10	20	50	80	100	140	150
0°	τ (MPa)	2.0481	1.8396	1.6365	0.9932	0.7547	0.5896	0.4251	0.3356
	σ_n (MPa)	1.99	0.6231	0.1088	0.0325	0.0083	-0.0069	-0.0019	-0.00085
30°	τ (MPa)	1.3092	0.8447	0.6943	0.5220	0.3211	0.2527	0.2066	0.1995
	σ_n (MPa)	1.0884	0.5645	0.0734	0.0260	0.0074	-0.0075	-0.0023	-0.00090
45°	τ (MPa)	0.8080	0.7129	0.6264	0.4881	0.3054	0.2291	0.1902	0.1665
	σ_n (MPa)	0.7135	0.5170	0.0442	0.0186	0.0060	-0.0080	-0.0036	-0.00094
60°	τ (MPa)	0.7529	0.6157	0.5785	0.4211	0.2820	0.1943	0.1490	0.1255
	σ_n (MPa)	0.5944	0.4645	0.0234	0.0092	0.00081	-0.0089	-0.0049	-0.00099
90°	τ (MPa)	0.6066	0.5325	0.4885	0.3907	0.2226	0.1796	0.1332	0.1058
	σ_n (MPa)	0.5186	0.4090	0.0198	0.0058	0.00060	-0.0096	-0.0058	-0.00001

Tableau IV .12. Effet de l'orientation des fibres pour le renforcement en appui d'une poutre continue en béton armé

Effet de l'orientation des fibres d'une poutre continue en béton armé renforcée <u>en appui</u>							
θ°	$x(\text{mm})$	0	10	20	50	80	100
0°	$\tau(\text{MPa})$	1.6564	1.4052	1.1922	0.7388	0.5036	0.2941
	$\sigma_n(\text{MPa})$	1.3793	0.4998	0.0864	0.0197	0.0054	-0.0076
30°	$\tau(\text{MPa})$	1.2083	0.8969	0.6556	0.4728	0.3045	0.2292
	$\sigma_n(\text{MPa})$	1.0887	0.4169	0.0669	0.0084	0.0046	-0.0086
45°	$\tau(\text{MPa})$	1.0029	0.7675	0.5748	0.4225	0.2667	0.1740
	$\sigma_n(\text{MPa})$	0.8702	0.3840	0.0408	0.0065	0.0029	-0.0099
60°	$\tau(\text{MPa})$	0.8539	0.6820	0.5025	0.3880	0.2010	0.1284
	$\sigma_n(\text{MPa})$	0.7005	0.3174	0.0300	0.0042	0.0018	-0.0001
90°	$\tau(\text{MPa})$	0.6690	0.5369	0.4418	0.3117	0.1855	0.0991
	$\sigma_n(\text{MPa})$	0.5027	0.2280	0.0210	0.0028	0.0010	-0.0002

VI.3. Conclusion

Dans la présente étude, une analyse théorique des contraintes d'interfaces a été présentée pour une poutre continue en béton armé renforcée en flexion par collage des plaques en matériau composite. Les résultats ont été comparés aux solutions existantes dans la littérature, le modèle actuel est en général réel, et il s'applique à des cas plus généraux de charges. Après la validation de cette nouvelle méthode avec celle de Hassaine Daouadji (2016) et Xue-jun He (2019), nous avons constaté Une bonne concordance entre les résultats des deux méthodes est observée, Ceci démontre que les déformations de flexion et de cisaillement de la plaque de composite n'ont qu'un très léger effet.

L'étude paramétrique, nous permet de tirer les conclusions suivantes :

Le maximum des contraintes d'interface (pic) est observé au bord de la plaque puis diminue, rapidement (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.

Le maximum des contraintes normales et de cisaillement diminue à mesure que l'épaisseur de l'adhésif augmente ou l'épaisseur (nombre de plis) de la plaque de composite diminue.

Prolonger le plus possible la longueur de la plaque de renforcement aux appuis, réduit les contraintes aux bords.

L'augmentation de la largeur de la plaque composite mène à une réduction des contraintes d'interface maximales.

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.

Différents arrangements de fibre à l'intérieur du stratifié composite CFRP sont considérés en évaluant le mécanisme d'effort des structures renforcées. Le module efficace de la plaque de CFRP collée extérieurement précontrainte augmente avec l'augmentation du pourcentage de la fibre alignée dans la direction longitudinale de la poutre.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude a porté sur le comportement mécanique de structures, renforcées par collage de matériaux composites. Nous nous sommes intéressés à l'analyse des contraintes d'interface dans les poutres continues en béton armé renforcées par collage des plaques en matériaux composites. Un des grands avantages de ce procédé de réparation est la possibilité de renforcer la structure sans interrompre l'exploitation de l'ouvrage. On peut tout de même noter un coût de fabrication de matériaux composites encore élevé. Mais cette contrainte économique est moindre par rapport à la reconstruction des ouvrages et à la valeur culturelle des patrimoines historiques.

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels, ils apportent de nombreux avantages fonctionnels tel que : légèreté, résistance mécanique élevée, liberté de formes, ainsi qu'une maintenance réduite. Le contexte général du présent travail est d'étudier le phénomène de décollement des plaques composites dans les poutres continues en béton armé renforcées par collage externes de ces plaques. Il est bien connu que, le collage d'une plaque de matériaux composites sur les surfaces tendues ou les surfaces latérales est un moyen très efficace pour renforcer ou réparer des structures en béton armé. La présence de matériaux composites sur les surfaces tendue améliore considérablement la résistance ultime en flexion, en cisaillement, en flambement pour les différents éléments structurels en béton armé renforcées en diminuant la propagation de fissures.

Le problème consiste à l'association de matériaux de nature et de comportement différents.

La présente étude a été réalisée sur des poutres continues en béton armé renforcées par collage des plaques en matériaux composites, afin de mettre en évidence l'effet des différents paramètres sur la distribution des contraintes d'interface dans le béton et dans la plaque en matériaux. Les conclusions tirées de la présente recherche sont les suivantes :

- Le maximum des contraintes d'interface (pic) est observé au bord de la plaque puis diminue, rapidement dans le cas des contraintes normales et progressivement pour les contraintes de cisaillement, pour atteindre toutes les deux la valeur zéro à mi travée.
- Prolonger le plus possible la longueur de la plaque de renforcement aux appuis, réduit les contraintes aux bords.

- Les contraintes d'interface sont influencées par les paramètres géométriques tels que l'épaisseur de la couche d'adhésif mène à une réduction significative des contraintes d'interface maximales.

Des études complémentaires peuvent être menés pour pouvoir compléter cette recherche nous pouvons citer entre autre :

- Améliorer la connaissance concernant la conception des poutres en béton armé renforcées par composites.
- Effectuer une étude technico-économique sur les systèmes renforcés ;
- La fiabilité des structures en béton armé renforcées par composite.

Références bibliographique

Référence bibliographique

- Benyoucef S, Tounsi A, Meftah S A, Adda Bedia E A. (2007) "Approximate analysis of the interfacial stress concentrations in FRP-RC hybrid beams", *Compos Interfaces* 13(7) pages 561–71.
- Benferhat R., Rabahi A., T. Hassaine Daouadji, Boussad A., Adim B. (2018) "Analytical analysis of the interfacial shear stress in RC beams strengthened with prestressed exponentially-varying properties plate" *Advances in Materials Research*, Volume 7, Number 1, pages 29-44.
- Benferhat R., T. Hassaine Daouadji and Rabahi A. (2019) "Effect of distribution shape of the porosity on the interfacial stresses of the FGM beam strengthened with FRP plate" *Earthquakes and Structures*, Vol 16, No 5 (2019), 601-609.
- Berthelot J.M. (2002), "Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures", édition Masson, 4ème édition, Le Mans, France.
- Boukhezar M, (2009) " Réhabilitation et renforcements des poutres au moyen des matériaux composites " Mémoire de Magister université de Constantine.
- Chaded A., T. Hassaine Daouadji, Rabahi A., Adim B., Benferhat R., and Fazilay A.(2018) "A high-order closed-form solution for interfacial stresses in externally sandwich FGM plated RC beams", *Advances in Materials Research*, vol. 6 no. 4 pp 317-328.
- Guelmine L, "Pathologies des constructions", Mémoire du master en Génie Civil de l'Université de Bordj Bou Arreridj.
- Hateb S, (2016) "Maintenance et réhabilitation des structures par Matériaux composites" , Mémoire du master en Génie Civil de l'Université Souk-Ahras.
- Hassaine Daouadji T., A. Rabahi, B. Abbes, B. Adim (2016) "Theoretical and finite element studies of interfacial stresses in reinforced concrete beams strengthened by externally FRP laminates plate", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2016, Volume 30, No 12, pages 1253–1280.
- Hassaine Daouadji T. (2013) "Analytical Analysis of the Interfacial Stress in Damaged Reinforced Concrete Beams Strengthened by Bonded Composite Plates" *strength of materials*, volume 45, issue5, pp 587-597.

- Hassaine Daouadji T. (2017) "Analytical and numerical modeling of interfacial stresses in beams bonded with a thin plate", *Advances in Computational Design*, Vol. 2, No. 1 pages 57-69.
- Hassaine Daouadji T., Rabahi, A., Abbas, B. and Adim, B. (2016), "Theoretical and finite element studies of interfacial stresses in reinforced concrete beams strengthened by externally FRP laminates plate", *Journal of Adhesion Science and Technology*, Volume 30(12), pages 1253-1280.
- Hassaine Daouadji T, (2020) "Cours des matériaux composite" destiné aux doctorants de la faculté des sciences appliquées de l'université de Tiaret.
- Ouzaa K, (2015) " Réhabilitation des structures" , Doctorat en Génie civil de l'université d'Oran) .
- Rabahi A., Benferhat R., T. Hassaine Daouadji, (2019) "Elastic analysis of interfacial stresses in prestressed PFGM-RC hybrid beams" *Advances in Materials Research*, vol. 7 no. 2 83-103.
- Rabahi A, T. Hassaine Daouadji, Benferhat R. and Adim B. (2018) "Nonlinear analysis of damaged RC beams strengthened with glass fiber reinforced polymer plate under symmetric loads" *Earthquakes and Structures*, Volume 15, Number 2, pages 113-122.
- Rabahi A, Rabia, Benferhat, Hassaine Daouadji T., Abbas, B., Belkacem, A. and Abbas, F. (2018), "Elastic analysis of interfacial stresses in prestressed PFGM-RC hybrid beams", *Adv. Mater. Res., Int. J.*, Volume 7(2), pages 83-103.
- Tounsi A. (2006) "Improved theoretical solution for interfacial stresses in concrete beams strengthened with FRP plate", *International Journal of Solids and Structures*, volume 43, Issues 14–15, pages 4154-4174
- Tounsi A., T. Hassaine Daouadji, Benyoucef S., Adda bedia E A. (2008) "Interfacial stresses in FRP-plated RC beams: Effect of adherend shear deformations", *International journal adhesion and adhesives*, volume 29 pages 313-351.
- Xue-jun He, Chao-Yang Zhou and Yi Wang (2019) "Interfacial stresses in reinforced concrete cantilever members strengthened with fibre-reinforced polymer laminates", *Advances in Structural Engineering* 1–12.