



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université d'Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil & Travaux Publics



Mémoire pour l'Obtention du diplôme de Master

Filière : GENIE CIVIL

Spécialité : STRUCTURE

Thème

**Etude de renforcement d'une poutre en Béton
Précontraint avec des plaques en matériaux
composite**

Présentée par :

AMRANI Mohammed Lamine

MEDJADJI Mohammed Reda

SOUTENU, LE 19 /09 /2023 , DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

PRESIDENT : Pr AMARA KHALED

EXAMINATRICE : Dr ATTIA AMINA

ENCADREUR : Pr GUENANECHÉ BOUCIF

ANNEE UNIVERSITAIRE 2022/2023

REMERCIEMENTS

Je tiens, d'abord à remercier en premier lieu et avant tout, notre Dieu le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience pour effectuer le présent travail et de m'avoir entouré de personnes formidables et dans chacune de mes étapes de mon parcours, contribués d'une manière ou d'une autre, chacune à sa façon, à la réalisation de cette thèse de mastère.

*Je remercier tout d'abord Monsieur le Professeur **GUENANECHÉ BOUCIF**, nos encadreur de recherche, qui nous a permis de réaliser cette thèse. Pour son suivi régulier, sa grande disponibilité et sa patience, ses enrichissants et précieux conseils incessants et ses encouragements.*

*Je voudrais remercier aussi Monsieur **AMARA KHALED** Professeur au Département de Génie Civil à l'université de Ain Temouchent, Monsieur **KAMEL ANTAR** docteur à l'université de Naama pour l'aide précieuse qu'il nous a apportée.*



DEDICACE AMINE

Je tiens avec grande plaisir à dédier ce modeste travail :
A ma source d'amour et de motivation Mon père Rabi yarahmou
Ma mère, et Ma femme qui m'ont soutenu et encouragé à
aller de l'avant durant mes années d'étude.

A mes cher frères Mokhtar, Abdelghani et Nasro et mes grandes sœurs
Latifa, et Fatna..

A toute ma famille, mes amies et les plus chers de ma vie sans
exception

A toute la promotion 2023 Génie civil structure
A tous les enseignants qui m'ont dirigé vers la porte de la réussite
A mon binôme REDA qui a contribué à la réalisation de ce
modeste travail et mes amies proches

Enfin : A toute personne qui occupe une place
dans mon cœur.



DEDICACE REDA

*D'abord, je voudrais remercier Dieu pour qui je suis arrivé ici, et remercier mes parents
qui m'ont soutenu dans ma vie et tous les membres de la famille,
sans oublier de remercier mon collègue AMRANI MOHAMMED LAMINE qui m'a aidé
à préparer ce sujet. Nous remercions également notre professeur*

GUENANECHÉ BOUCIF

*qui nous a donné tout son temps et ses connaissances pour nous aider à terminer
le dossier*

Résumé

L'étude de comportement des éléments de structure métalliques et non métalliques est compliquée à cause de la non linéarité des matériaux surtout à l'état plastique. De plus en plus, l'ajout d'autres matériaux rend l'élément plus compliqué. Dans ce cadre, les poutres en béton armé renforcées avec des matériaux composites en fibres FRP est l'un des systèmes compliqués qui a pris l'attention des chercheurs. Cette technique consiste au renforcement par collage externe des composites en fibres (verre, carbone, kevlar, etc.....) qui contribuent au renforcement et à la réparation rapide et efficace des structures endommagées, elle peut aussi rendre aux éléments de la structure leur résistance leur rigidité et leur capacité portante.

Mots clés : *Poutre, Plaque, PRFC, Béton armé, Comportement.*

Abstract

The study of the behavior of metallic and non-metallic structural elements is complicated because of the non-linearity of the materials, especially in the plastic state. Increasingly, the addition of other materials makes the element more complicated. In this framework, reinforced concrete beams reinforced with FRP fiber composite materials is one of the complicated systems that has caught the attention of researchers. This technique consists of the reinforcement by external bonding of fiber composites (glass, carbon, kevlar, etc.) which contribute to the reinforcement and the rapid and effective repair of damaged structures; it can also restore the elements of the structure to their resistance. Their stiffness and bearing capacity.

Keywords: *Beam, Plate, CFRP, Reinforced concrete, Behavior.*

ملخص

تعتبر دراسة سلوك العناصر الإنشائية المعدنية وغير المعدنية معقدة بسبب عدم خطية المواد ، خاصة في الحالة البلاستيكية. على نحو متزايد ، تؤدي إضافة مواد أخرى إلى جعل العنصر أكثر تعقيدًا. في هذا الإطار ، تعتبر الحزم الخرسانية المسلحة المقواة بمواد ألياف FRP أحد الأنظمة المعقدة التي لفتت انتباه الباحثين. تتكون هذه التقنية من التعزيز عن طريق الترابط الخارجي لمركبات الألياف (الزجاج ، والكربون ، والكيفلار ، وما إلى ذلك) والتي تساهم في التعزيز والإصلاح السريع والفعال للهياكل التالفة ، ويمكنها أيضًا استعادة عناصر الهيكل لمقاومتها. صلابتها وقدرتها على التحمل.

الكلمات المفتاحية: كمرّة ، لوحة ، FRP ، سلوك

.		
I.5.5	Domaine d'application de PRFC	17
.		
I.5.6	Utilisations dans le domaine de construction	18
.		
I.6	Plaques en PRFC	18
.		
I.6.1	Description	18
.		
I.6.2	Domaines d'utilisation	18
.		
I.6.3	Avantages des plaques en PRFC	19
.		
I.7	Conclusion	20
.		

CHAPITRE II : TYPES DE RENFORCEMENT

II.1.	Introduction	22
II.2.	Renforcement.....	22
.		
II.3.	Types de renforcement.....	23
II.3.1	Renforcement avec des barres.....	23
.		
II.3.1.1	Barres en carbone (PRFC).....	23
.		
II.3.1.2	Barres en verre (PRFV).....	26
.		
II.3.1.3	Barres en Aramide (PRFA).....	26
.		
II.3.2	Renforcement avec des plaques.....	26
.		
II.3.2.1	Renforcement par collage de plaques composites.....	26
.		
II.3.3	Renforcement avec en tissu.....	32
.		
II.3.3.1	Tissu de fibres de carbone (TFC).....	32
.		
II.3.3.2	Tissu en fibres en verre.....	36
.		
II.4.	Conclusion.....	39

**CHAPITRE III : ANALYSE DES CONTRAINTS
INTRFACIALES D'UNE POUTRE
EN BETON RENFORCEE PAR MATERIAUX
COMPOSITES**

III.1. Résumé.....	41
III.2. Introduction.....	41
III.3. Modélisation de la poutre renforcée	41
III.4 . Formulation mathématique des équations des contraintes.....	43
III.4-1 . Hypothèses fondamentale.....	43
III.4-2 Equations différentielles.....	43
III.5 Méthode de détermination des déformations longitudinales	44
III.6 Distribution des contraintes normales.....	48
III.7 Solutions générales pour les contraintes interfaciales.....	49
III.8 Contrainte normale d'interface pour la charge répartie	50
III.9 Etude de la flexion des poutres renforcées par des plaques en FRP	51
III.9-1 Force axiale le long de la plaque pour la charge répartie	51
III.9-2. Equation différentielle de la déformée verticale ou flèche	51
III.9-2. Solution analytique pour le comportement en flexion	51
III.10. Résultats et discussion	52
III.11. Conclusion	57
V Référence et bibliographie.....	58

Tableau 1.1 :	Avantages et inconvénients des matériaux composites	12
Tableau 1.2 :	Caractéristique des fibres de carbone	16
Tableau 1.3 :	Propriétés en traction des fibres de carbone	16
Tableau 1.4 :	Avantages et inconvénients des fibres de carbone	17
Tableau 3.1 :	Caractéristique géométrique de la poutre....	54

Figure 1.1 :	Exemple d'un matériau composite	5
Figure 1.2 :	Différents types des fibres	8
Figure 1.3 :	Différentes familles de matrice	10
Figure 1.4 :	Fibres de carbone	13
Figure 1.5 :	Processus de fabrication du PAN et des fibres de carbone.....	15
Figure 1.6 :	Plaques en PRFC.....	19
Figure 2.1 :	Renforcement par collage de plaques composites.....	27
Figure 2.2 :	Réparation avec du mastic.....	28
Figure 2.3 :	Collage des plaques en FRP.....	29
Figure 2.4 :	Tissu de fibres de carbone.....	32
Figure 2.5 :	Domaine d'application de Tissu de fibres de carbone.....	33
Figure 2.6 :	Mise en place du confinement par tissu TFC	35
Figure 2.7 :	Tissu en fibres en verre.....	37
Figure 2.8 :	Technologie d'application de tissu de fibre de verre.....	38
Figure 3.1 :	Poutre renforcée simplement appuyée sur ses appuis simples	43
Figure 3.2 :	Élément infinitésimal de la poutre renforcée	43
Figure 3.3 :	Charge uniformément répartie.....	50
Figure 3.4 :	Contraintes de cisaillement interfaciales	54
Figure 3.5 :	Contraintes de cisaillement interfaciales	55
Figure 3.6 :	Contraintes de cisaillement interfaciales	55
Figure 3.7 :	Contraintes de cisaillement interfaciales	56
Figure 3.8 :	Contraintes de cisaillement interfaciales	57

Symbol es	Signification
<i>CFRP</i>	Polymère renforcé par fibres de carbone
<i>HR</i>	Haute résistance
<i>HM</i>	Haut module
<i>PREV</i>	Fibres de verre
<i>PRFA</i>	Fibres d'aramides
<i>PRFB</i>	Fibres de basaltes
<i>TD</i>	Résines thermodurcissables
<i>TP</i>	Résines thermoplastiques
<i>UP</i>	Résines polyesters
<i>EP</i>	Résines époxyde
<i>PIRP</i>	Résines polyamides thermodurcissables
<i>PF</i>	Résines phénoliques
<i>PRF</i>	Polymère renforcé avec des fibres
<i>PEEK</i>	Polyester-éther-Cétone
<i>PPS</i>	Polypropylène
<i>PSUL</i>	Poly sulfone
<i>PAN</i>	Poly acrylonitrile
<i>IM</i>	Fibres à module intermédiaires
<i>THM</i>	Fibres de très haut module
<i>TFC</i>	Tissu de fibres de carbone
$u1(x)$ et $u2(x)$	déplacements longitudinaux
u_1^N	déplacement adhésif
y et y'	système de coordonnées local
σ_{xy}	contraintes de cisaillement
$G1$ et $G2$	modules de cisaillement transversal des adhérents 1 et 2
$t1$ et $t2$	les valeurs d'épaisseur des adhérents 1 et 2
$U_1^N(0)$	déplacement à la surface supérieure de l'adhérent supérieur e
$\Delta N2,$	contraintes normales longitudinales

AI	sections transversales de l'adhérent
$\tau(x)$	contrainte de cisaillement à la couche d'adhésif

Introduction

Introduction :

Les plaques en polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC) sont largement utilisées pour le renforcement des poutres en béton armé, précontraint ou métalliques. Elles sont généralement fixées à la partie inférieure des poutres, c'est-à-dire du côté tendu, afin d'améliorer leur capacité de charge et de prévenir la rupture.

Les plaques en PRFC offrent plusieurs avantages dans le renforcement des poutres. Tout d'abord, elles ont un rapport résistance-poids élevé, ce qui signifie qu'elles sont capables de supporter des charges élevées tout en étant légères en poids. Cela permet d'augmenter la capacité de charge des poutres sans ajouter de charges excessives sur la structure.

De plus, les plaques en PRFC sont non corrosives, ce qui les rend durables et résistantes à la corrosion. Contrairement à d'autres matériaux de renforcement, elles ne sont pas affectées par les agents chimiques présents dans l'environnement, ce qui prolonge leur durée de vie utile.

Les plaques en PRFC peuvent être utilisées pour renforcer les poutres en flexion et en cisaillement. Elles sont fixées à la partie tendue de la poutre pour augmenter sa résistance à la flexion et empêcher sa déformation excessive. De plus, elles peuvent également améliorer la résistance au cisaillement de la poutre en augmentant la capacité de transfert des forces de cisaillement à travers la section.

Les recherches ont porté sur l'évaluation du comportement des poutres renforcées avec des plaques en PRFC, en examinant leur capacité de charge améliorée, leur comportement de rupture et leur durabilité à long terme. Les études expérimentales et numériques ont permis de développer des modèles et des méthodes de conception pour optimiser l'utilisation des plaques en PRFC dans le renforcement des poutres.

Pour atteindre l'objectif principal de cette recherche, le présent mémoire est organisé en trois chapitres, à savoir :

- La partie bibliographique qui comprend les deux chapitres I et II, le premier chapitre, elle présente une introduction et les différentes caractéristiques de polymère renforcé de fibres (FRP). D'autre part, à travers le deuxième chapitre, elle présente les différentes méthodes de renforcement des poutres par des matériaux composites.

- La troisième partie qui définit l'analyse des contraintes interfaciales de l'étude sur MathCad 15, ainsi que sa validation.

Enfin, ce mémoire est clôturé par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats et remarques trouvés et quelques perspectives pour les futures recherches.

CHAPITRE I

Introduction et caractéristiques de FRP

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur l'identification des matériaux composites, en mettant particulièrement l'accent sur les fibres de carbone. Nous commencerons par examiner l'histoire des matériaux composites, en mettant en évidence leur développement et leur utilisation au fil du temps. Matériaux composites

Définition

Un matériau composite est formé par l'association de deux composants principaux : les fibres, qui assurent le renforcement et les propriétés mécaniques du matériau, et la matrice, qui les entoure et assure le maintien des fibres dans une structure cohésive.

Il est possible de moduler les comportements mécaniques et physiques en modifiant les éléments suivants : la nature des composants, la proportion des composants et l'orientation des fibres.

Les fibres procurent les principales propriétés mécaniques du matériau composite, par exemple rigidité, la résistance et la dureté

Un matériau composite consiste en un renforcement généralement sous forme de fibres minérales, organiques ou végétales qui assurent une résistance mécanique (résistance à la traction) et un liant. Appelée matrice habituellement sous forme d'une matière plastique (polymère)

Donc un matériau composite est constitué généralement d'une matrice et d'un renfort (**Figure 1.1**), qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser et qu'ils sont très hétérogènes et anisotropes

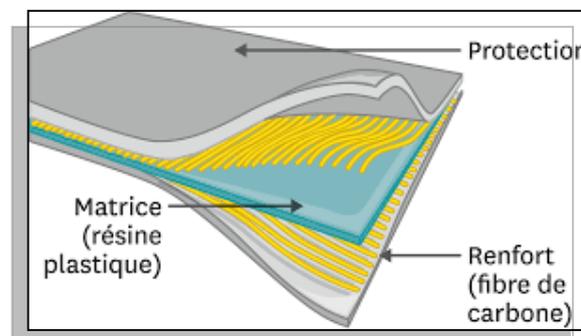


Figure 1.1: Exemple d'un matériau composite.

Constituants des matériaux composites

Les composites sont des matériaux synthétiques fabriqués avec des mélanges intimes de matériaux de différent état, composition, et forme. Leurs composants sont toujours clairement différenciés et gardent leur identité séparée. Cependant, ils travaillent de manière solidaire dans le composite, en réunissant des caractéristiques qui ne sont pas atteintes séparément

a/-Les fibres

Les fibres (renforts) Le renfort dans un matériau composite est responsable de la résistance et de la rigidité. Il est généralement constitué de fibres, de particules ou de feuilles. Les types de renfort les plus couramment utilisés sont les fibres de carbone, les fibres de verre, les fibres d'aramide et les particules de céramique. Le renfort est généralement disposé dans la matrice d'une manière spécifique pour améliorer les propriétés mécaniques du matériau composite. Fibres de carbone (CFRP)

Les fibres de carbone peuvent être extraites à partir de pétrole brut ou de charbon, ou par synthèse à partir de poly acrylonitrile. Il existe deux types de fibres de carbone, celles à haute résistance (HR) issues d'une mise en œuvre par carbonisation, et celles à haut module (HM) issues d'une fabrication par graphitisation.

Les fibres de carbone ont une très bonne tenue thermique et un très faible coefficient de dilatation. En outre, les fibres de carbone sont inertes à température ambiante ainsi que pour la plupart des agents chimiques.

➤ **Fibres de verre (PREY)**

Les fibres de verre sont moins chères et présentent une plus faible résistance mécanique une plus grande déformabilité, ce qui les rend la solution la plus utilisée dans plusieurs applications, tel que le génie civil, l'industrie des bateaux et d'automobiles. Par contre Les plus grands inconvénients des fibres de verre sont les problèmes de relaxation (sensibilités à l'humidité) et leur dégradation par des phases alcalines, mais avec le choix correct de matrice les fibres sont protégées.

- Les différents types de fibres de verre, classés selon leurs applications spécifiques, sont :
 - Verre E (Electrique) possédant d'excellentes propriétés d'isolation électrique (le moins cher) ;
 - Verre S (Résistant) ayant de très hautes résistances et rigidité à la traction (le plus cher) ;
 - Verre C (Chimique) stable chimiquement dans les environnements acides ;
 - Verre AR (Alcali-Résistant) utilisé pour prévenir la corrosion l'attaque dans des matrices cimentaires.

➤ **Fibres d'aramides (PRFA)**

Les fibres d'aramides sont utilisées dans diverses applications, notamment dans l'industrie aérospatiale, l'industrie automobile, la fabrication d'équipements de protection individuelle tels que gilets pare-balles et casques, ainsi que dans d'autres applications nécessitant des matériaux légers, résistants et durables.. Les fibres d'aramide sont produites par plusieurs fabricants sous différents noms de marque telles que :

- Kevlar (Dupont, USA); > Twaron (Akzo, Pays-Bas);
- Technora (Teijin, Japon): - SVM (Russie).

Comme avantage ces fibres ont une très grande ténacité qui leur confère une bonne résistance au choc et à la fatigue, et un comportement élastique en traction et ductile en compression. Cependant, Les fibres d'aramide sont sensibles aux températures élevées et aux radiations « ultra-violet ».

➤ **Fibres de basaltes (PRFB)**

Les fibres de basalte, également connues sous le nom de PRFB (Polymer Reinforced Fiber Basalt), sont des fibres obtenues à partir de roches volcaniques basaltiques. Elles sont principalement composées de minéraux tels que le plagioclase, le pyroxène et l'olivine. Les fibres de basalte présentent des propriétés chimiques intéressantes et sont utilisées dans diverses application.



Fibres de verre



Fibres de carbone



Fibres d'aramides



Fibres de basaltes

Figure 1.2: Différents types des fibres.

b/- Matrices

Les matrices dans les matériaux composites jouent un rôle crucial en fournissant un support structurel aux fibres de renforcement et en transférant les charges appliquées sur le matériau composite. Elles sont responsables de la cohésion et de l'intégrité globale du composite

-Les différents paramètres qui influencent les propriétés mécaniques des polymères sont :

- La température ;
- La forme et la distribution des masses moléculaires ;
- La cristallinité ;
- La fréquence.

1. Résines thermodurcissables (TD)

Elles sont associées à des fibres longues, leur structure à la forme d'un réseau tridimensionnel, dont la transformation est irréversible. Du fait de ces caractéristiques plus élevées, les résines thermodurcissables sont les plus employées actuellement dans la mise en œuvre des matériaux composites. Parmi ceux qui sont les plus utilisés:

- Les résines polyesters (UP) : sont généralement utilisées avec les fibres de verre ; les résines vinylester : sont surtout utilisées pour des applications où les résines polyester ne sont pas suffisantes ;
- Les résines époxyde (EP) : qui possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques. Elles sont généralement utilisées avec les fibres de carbone : les résines polyamides thermodurcissables (PIRP) pour des applications à haute température.
- Les résines phénoliques (PF) : utilisées dans les applications nécessitant des propriétés de tenue aux feux et flammes.

2. Résines thermoplastiques (TP)

Elles sont associées à des fibres courtes, et forment une structure réversible dont ils peuvent être recyclés et utilisés plusieurs fois. Malgré ces bonnes tenues mécaniques, elles présentent quelques inconvénients comme la mauvaise adhérence sur les fibres, la viscosité élevée et les coûts de fabrication

Les principales familles thermoplastiques utilisées dans les composites PRF sont :

- Le polyester-éther-cétone (PEEK).
- Le polypropylène (PPS).
- Le poly sulfone (PSUL).

Les différentes familles de matrice sont résumées dans le schéma de la **Figure 1.3**

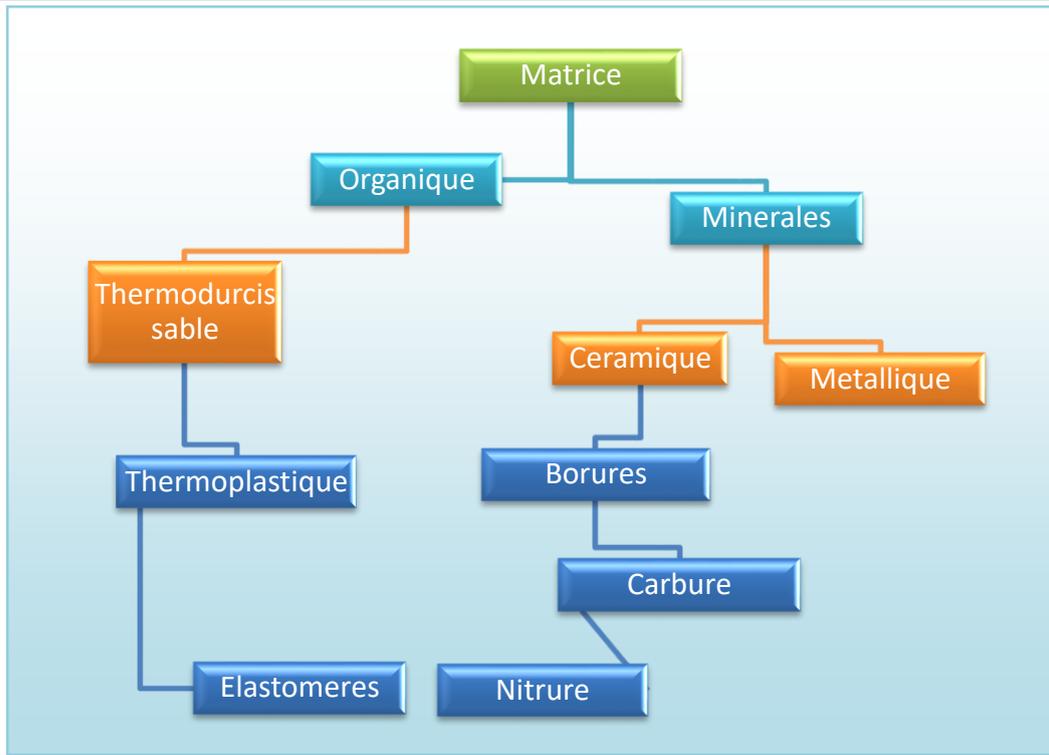


Figure 1.3 : Différentes familles de matrice.

c/-Interfaces

Afin d'assurer une compatibilité entre le renfort et la matrice l'utilisation d'une couche d'interface est indispensable qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Bonne adhérence en couche fine

Ces produits chimiques entrent aussi dans la composition du composite, qui peuvent jouer sur le comportement mécanique notamment, la résistance au cisaillement inter laminaire, la résistance à la corrosion et au vieillissement, et la tenue en fatigue et aux chocs, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite. + Couche désigne couche supérieure, - couche désigne couche inférieure

Propriétés du composite

Les propriétés mécaniques du composite varient selon la matrice, les fibres utilisées, de leur distribution et de leur direction. Les composites contiennent en général entre 30 et 60 % de fibres. Les fibres peuvent être disposées toutes dans le même sens ou selon un quadrillage particulier ; désigné comme composite unidirectionnel ou multidirectionnel. Dans les expériences, un tissu de fibres de carbone bidirectionnel également appelé maillage à 90° sera utilisé (Florianne et Al, 2018).

Dans le cas d'un composite unidirectionnel, la résistance à la traction est supérieure dans la direction des fibres que dans la direction perpendiculaire. Il est donc primordial de placer le CFRP dans le sens adéquat (Florianne et Al, 2018).

Classification des matériaux composites

➤ **Composites à fibres**

Les matériaux composites renforcés de fibres sont des fibres continues ou discontinues sous forme de fibres coupées et de fibres courtes, etc. La disposition des fibres, leur orientation permettant de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites pour obtenir des matériaux s'étendant des matériaux fortement. Le concepteur possède donc un type de matériel à partir duquel il peut modifier et moduler à sa guise les comportements mécaniques et physiques en jouant sur :

- La nature des constituants.
- La proportion des constituants.
- L'orientation des fibres.

Le rôle des particules est très important dans l'interprétation du composite, il consiste à améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'élaboration, la diminution des retraits...etc. Dans de nombreux cas, les matières particulaires sont simplement utilisées comme charge afin de réduire le coût des matériaux sans réduire leurs propriétés

➤ **Composite à particules**

Les matériaux composites sont des matières particulaires lorsque le renfort prend la forme de particules. Les particules, contrairement aux fibres, n'ont pas de dimensions préférées.

Matériaux Composites Structuraux

La rigidité d'un composite dépend du nombre et de l'empilage des couches, de leur nature, de leur orientation, de leur séquence d'empilement, etc. Généralement les matériaux composites structuraux sont classés en trois catégories:

- Les monocouches
- Les stratifiés
- Les sandwichs
- Autre structures (structure 3D)

Applications des matériaux composites « PRF » en génie civil

Dans le génie civil, l'utilisation des matériaux composites occupe une grande part de plus en plus importante par rapport aux autres secteurs grâce à leurs propriétés avantageuses telles que la légèreté, la rigidité et la résistance spécifiques, la résistance à la fatigue et à la corrosion

En général, la technique d'utilisation des matériaux composites peut être utilisée pour améliorer la ductilité ainsi que d'autres propriétés, le type PRF polymère renforcée de fibres

Avantages et inconvénients des matériaux composites

Les avantages et inconvénients principaux de l'utilisation de matériaux composites est résumé dans le **Tableau** suivant :

Tableau 1.1: Avantages et inconvénients des matériaux composites

Avantages	Inconvénients
Légèreté Grande possibilité de maniement Insensibilité à l'humidité, la chaleur et la corrosion Bonne tenue aux agressions chimiques et naturelles (UV) Bonne tenue en fatigue Résistance et rigidité élevées Amortissement d'énergie	Sensibilités aux impacts Difficulté de réparation

Matériaux PRF

Les matériaux composites en polymères renforcés de fibres « PRF » sont des produits de synthèse constitués principalement de renforts fibreux qui donnent aux composites leur comportement hautement directionnel, imposant anisotrope et essentiellement linéaire élastique jusqu'à la rupture

Intérêt des polymères renforcés de fibres dans le bâtiment et les travaux publics

L'intérêt des utilisations des polymères renforcés de fibres dans le génie civil se trouve essentiellement dans :

- Sa faible densité ;
- Ses propriétés mécaniques longitudinales ;
- L'absence de corrosion ;
- Sa très bonne tenue à la fatigue ;
- Sa facilité de manipulation.

Fibres de carbone

Les fibres de carbone ont fait leur apparition en 1880 grâce à T. Edison qui les utilisa comme filament dans les lampes. A partir de 1960, des recherches se sont orientées vers la conception de fibres de carbone de haut module et de haute résistance.

Les fibres de carbone peuvent être produites à partir de l'un des trois précurseurs suivants : la rayonne, le Poly acrylonitrile (PAN) et le brai de pétrole. Cependant, les fibres de carbone utilisées pour les renforts sont produites à partir de brai de mésophase ou de PAN

Définition

La fibre de carbone fait partie d'une famille de matériaux appelés les composites. Il s'agit de matériaux faits de deux ou plusieurs matériaux constitutifs qui demeurent séparés et distincts à l'échelle macroscopique tout en formant un seul composant. Autrement dit, les produits ne subissent pas de réaction chimique, mais demeurent deux entités chimiques séparées (Québec, 2007).

Les matériaux composites les plus primitifs comprenaient la paille et la boue utilisées afin de fabriquer des briques pour la construction de bâtiments (Québec, 2007).



Figure 1.4: Fibres de carbone.

Processus et éléments de base de la production

La production de fibres de carbone à partir de brai de mésophase nécessite tout d'abord de traiter thermiquement le brai isotope afin d'orienter les molécules poly aromatiques. Ensuite, le filage et l'étirage de cette mésophase sont réalisés pour l'obtention des fibres. Les difficultés rencontrées lors du filage et de l'étirage sont liées à la viscosité croissante de cette phase qui survient avec l'augmentation de la masse moléculaire de la mésophase (augmentation du taux de structures poly aromatiques orientées).

Les fibres ainsi formées présentent deux types de textures dont la structure "oignon" (alignements concentriques) est souhaitée en raison de sa meilleure résistance à la propagation des fissures. Les fibres sont ensuite oxydées puis carbonisées et graphitées. L'oxydation permet de rendre la fibre infusible avant de procéder à la carbonisation à 1500°C. Selon la qualité de la fibre de carbone recherchée, l'étape de graphitisation (jusqu'à 2000°C) est réalisée pour augmenter le module à la traction. La fabrication des fibres de carbone à partir de PAN passe par quatre étapes (voir **Figure 1.5**)

Tout d'abord, les fibres de PAN sont oxydées à des températures allant de 200 à 400°C pour un temps qui varie entre 30min et 3h. Cette étape a pour objectif de rendre les fibres de PAN infusibles en formant des cycles poly aromatiques. Ensuite, les fibres de PAN oxydées sont carbonisées sous atmosphère neutre d'azote à des températures allant de 1000 à 1500°C.

La carbonisation permet d'enrichir le matériau en carbone (95 % de carbone) et de modifier sa microstructure. La fibre est alors composée d'unités poly aromatiques de base mesurant environ 1 nm ce qui confère une structure organisée limitée. Finalement, la fibre carbonisée est ensuite graphitisée (portée à une température entre 1800 et 2000°C) afin d'augmenter son taux de carbone (99 % de carbone graphite). Cette étape conduit à une croissance et une orientation des cristaux nano scopiques dans l'axe longitudinal de la fibre. On obtient donc des filaments de 5 à 7 µm de section, très longs et ayant une très grande résistance à la traction.

La fibre de carbone ainsi obtenue (après carbonisation ou graphitisation) possède une mauvaise adhérence avec les polymères. En effet, les unités de base sont plus ou moins fortement liées chimiquement entre elles, ce qui réduit les propriétés d'adhérence de la surface. Les fibres subissent alors un traitement de surface qui est choisi en fonction de l'adhérence fibre/matrice requise. Le traitement peut être de nature physique (création de

rugosités de surface pour améliorer l'adhérence) ou de nature chimique (fonctionnalisation de la surface, modification de l'énergie inter faciale).

Enfin la manipulation des fibres de carbone nécessite, comme les fibres de verre, la mise en forme d'un fil de base. Ce fil est obtenu après ensimage de la fibre de carbone et par association de plusieurs fibres. Ces fils de base sont ensuite bobinés ou tissés. Industriellement, les fibres de carbone obtenues par le précurseur PAN sont technologiquement plus faciles à produire car les filaments de PAN donnent directement les fibres de carbone. Ce procédé continu est aussi très stable ce qui permet d'obtenir une qualité de fibre stable au cours de la production. De ce fait, les fibres sont principalement produites par ce procédé. Les fibres issues du précurseur brai de mésophase sont réservées exclusivement à la production de fibres de hauts modules d'élasticité mais ayant une résistance à la traction limitée. 95% des fibres de carbone fabriquées sont destinées à la fabrication des polymères renforcés.

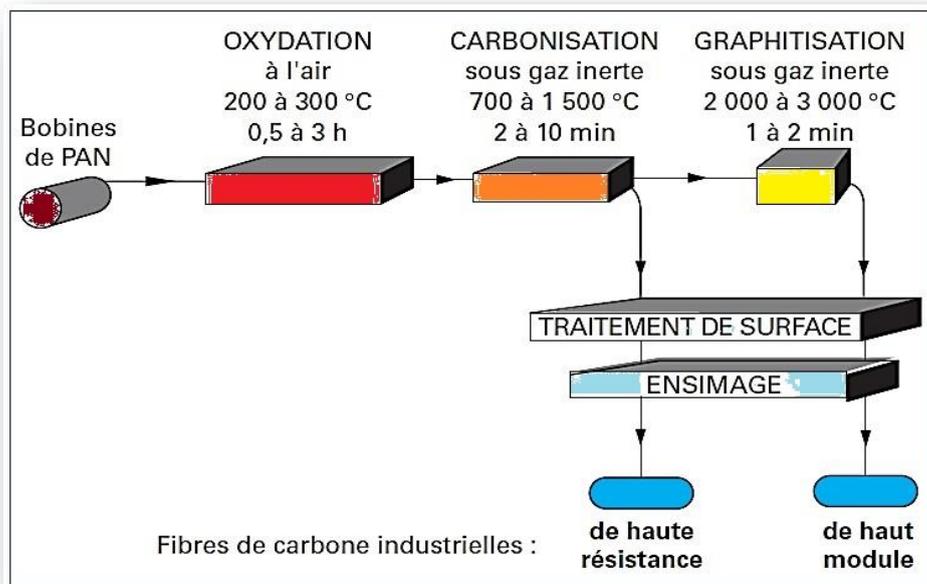


Figure 1.5 : Processus de fabrication du PAN et des fibres de carbone.

Propriétés thermomécaniques et physico-chimiques

Comparativement aux fibres de verre, les fibres de carbone ont une nanostructure ordonnée ce qui offre un bien meilleur module d'élasticité et une meilleure résistance à la traction par rapport à la structure amorphe de la fibre de verre (**Tableau 1.2**). Par contre, le taux d'allongement à la rupture des fibres de carbone est significativement plus faible que celui des fibres de verre .

Tab1.2 : Caractéristique des fibres de carbone

Caractéristique	Diamètre	Densité	Résistance à la traction	Module de Young
Valeur	5-7(μ m)	1.8 (g/cm ³)	2410-5790 (MPa)	230-825 (GPa)

S'agissant les Propriétés en traction des fibres de carbone sont résumés dans le

Tableau 1.3.

Tab1.3 : Propriétés en traction des fibres de carbone

Fabrication	Nom commercial		Classe	E (GPa)	σ (MPa)	ϵ (%)	Précurseurs
Toray (Asie)	Toray	T300	HR	230	3530	1.5	PAN
Soficar		T300 J	HR	230	4210	1.8	PAN
(Europe)		T400 H	HR	250	4410	1.8	PAN
CFA (USA)		T700 S	HR	230	4900	2.1	PAN
		T800 H	IM	294	5490	1.9	PAN
		T800S	IM	294	6370	2.2	PAN
		T1000 G	HM	377	4410	1.2	PAN
		M40	HM	475	4120	0.8	PAN
		M40J	HM	540	4020	0.8	PAN
		M46 J	HM	588	3920	0.	PAN
		T400 H	HR	250	4410	1.8	PAN
		T101 F	UG	33	800	2.4	Brai iso
		T201 F	UG	33	700	2.1	Brai iso
		P-55 S	HM	380	1900	0.5	Brai méso
		P-75 S	HM	520	2100	0.4	Brai méso
		P-100 S	TH M	760	2410	0.3	Brai méso
		P-120 S	TH M	825	2410	0.3	Brai méso

1) D'après les fiches techniques des producteurs

Avantages et inconvénients des fibres des carbones

Les fibres de carbone présentent plusieurs atouts et quelques inconvénients qui sont résumés dans le **Tableau 1.4**.

Tab1.4 : Avantages et inconvénients des fibres de carbone

Avantages	Inconvénients
Légèreté Haute performance Grande résistance à la fatigue Stabilité thermique Transparence aux rayons X Résistance et rigidité élevées Faible dilatation thermique	Coût de fabrication élevé Tenue faible au choc et à l'abrasion bobinage difficile (raideur élevée)

Les fibres de carbone présentent l'inconvénient d'être sensibles en atmosphère oxydante. Ceci est important à prendre en considération lors de l'élaboration ou du recyclage d'un composite. Les fibres de carbone commercialisées peuvent être classées selon leurs propriétés en traction. Le tableau 1.5 présente la répartition des différents types de fibres de carbone selon leurs fournisseurs correspondants. On distingue (Chayma2017):

- Les fibres d'usage général ou d'application thermique (UG) : $E < 200 \text{ GPa}$;
- Les fibres haute résistance (HR) : $200 \text{ GPa} < E < 250 \text{ GPa}$;
- Les fibres à module intermédiaires (IM) : $250 \text{ GPa} < E < 350 \text{ GPa}$;
- Les fibres haut module (HM) : $350 \text{ GPa} < E < 550 \text{ GPa}$;
- Les fibres de très haut module (THM) : $E > 550 \text{ GPa}$.

Domaine d'application de PRFC

Essentiellement, le plastique renforcé de fibre de carbone peut être utilisé presque partout où l'on utilise actuellement l'acier, l'aluminium ou tout autre matériau synthétique, ce qui comprend le tunnel, le châssis, les composants de suspension, le capot, la boîte à air, les pièces de protection et ainsi de suite. Les utilisations sont donc pratiquement illimitées. L'inconvénient principal du matériau est son prix. Sa résistance aux chocs est également un problème, bien que celui-ci puisse être en grande partie résolu en intégrant d'autres substances Comme le Kevlar dans le mélange (Marc, 2021).

Utilisations dans le domaine de construction

Dans le domaine de génie civil, la réparation, la réhabilitation ou le renforcement des structures à l'aide de matériaux composite connaissent un large essor ces dernières décennies. Dans le cas du renforcement des structures en béton armé, ce procédé consiste à associer aux armatures internes défaillantes ou insuffisantes d'une structure existante, un matériau résistant aux efforts de traction. Collées sur les faces externes des zones tendues de la pièce à renforcer, les fibres de carbone tissées participent à la reprise des sollicitations de la structure. Ceci a été déjà validé expérimentalement

Plaques en PRFC

Description

La plaque est fabriquée dans un matériau composite de carbone de haute qualité (plastique renforcé avec des fibres de carbone, PRFC) produit industriellement et qui se distingue par sa grande résistance et une grande qualité.

Le PRFC est un plastique renforcé de fibres de carbone dans lequel les fibres de carbone sont intégrées en renfort, la plupart de temps en plusieurs couches, au sein d'une matrice en résine synthétique. Composants hautement résistants – principalement destinés à la construction aéronautique et à la course. Le PRFC peut être travaillé facilement (fraisage, perçage, sciage, ponçage).

Le PRFC peut être utilisé pour des applications à haute température. Parfait pour le modélisme, car le carbone possède une grande résistance pour un faible poids. Le matériau n'est pas flexible, extrêmement léger, très stable, ne se corrode pas, à l'aspect caractéristique et prisé du carbone grâce à sa structure tissée (**Alfa-Carbon, 2022**).

Domaines d'utilisation

- Plaques d'impression pour l'impression en 3D.
- Drones, multi-coptères.
- Modélisme.
- Construction navale et de bateaux.
- Sport automobile.
- Pièces en carbone.
- Renforcement et réparations des éléments structuraux.

Avantages des plaques en PRFC

- Faible masse.
- Excellente résistance à la fatigue.
- Peut être utilisé à grande vitesse.
- En amortissant les vibrations il permet des utilisations silencieuses.
- Montage et démontage faciles.

Les panneaux en PRFC permettent de produire d'excellentes structures en sandwich. Ainsi, un morceau de mousse peut être déposé entre deux plaques en PRFC, puis découpé à la forme souhaitée. Le résultat est très léger mais très stable (**Alfa-Carbon, 2022**).

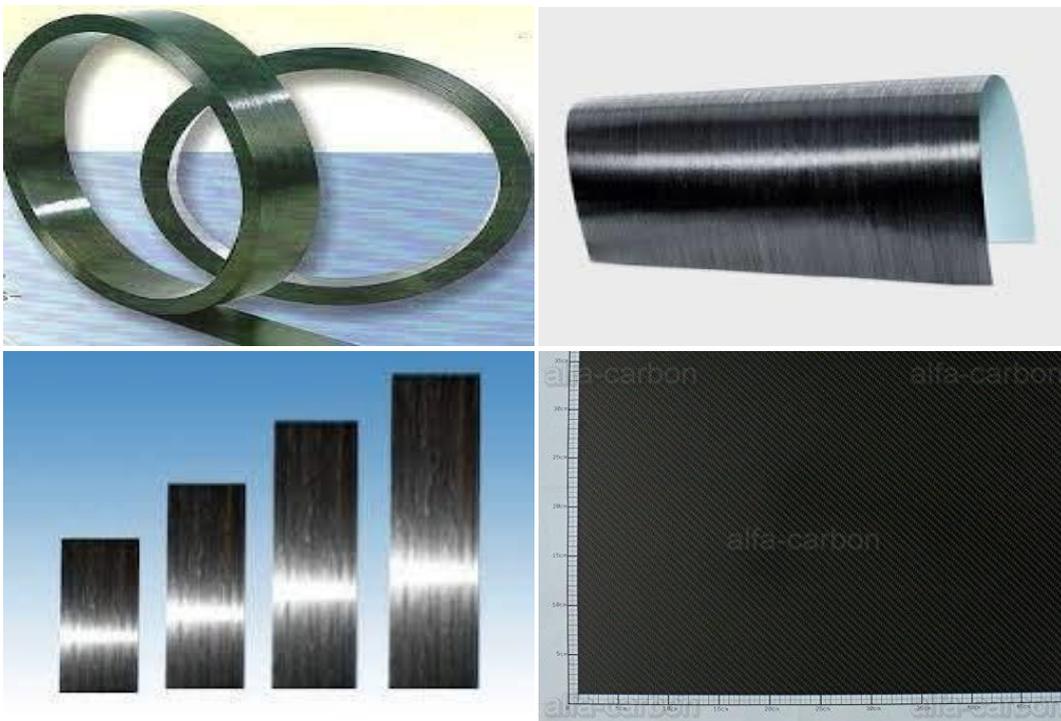


Figure 1.6 : Plaques en PRFC.

Conclusion

Dans ce chapitre, conclure que dans le génie civil, l'utilisation des matériaux composites (PRF) occupe une grande part de plus en plus importante par rapport aux autres secteurs grâce à leurs propriétés avantageuses telles que la légèreté, la rigidité et la résistance spécifiques, la résistance à la fatigue et à la corrosion.

En général, la technique d'utilisation des matériaux composites peut être utilisée pour améliorer la ductilité ainsi que d'autres propriétés.

CHAPITRE II

Types de Renforcement

Introduction

En raison du séisme survenu dans les régions de Boumerdès et d'Alger en 2003, de nombreux bâtiments en béton armé se sont, soit effondrés, soit endommagés de façon dangereuse. La question de les démolir et de les reconstituer à nouveau ou bien de les réparer dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est de plus en plus élevé et les conditions de réparation de plus en plus difficiles, fut alors posée. Une alternative aux techniques traditionnelles de réparation a été récemment mise en point. Il s'agit de la technique de renforcement par différents types. Cette technique se diffuse de plus en plus dans le domaine du génie civil. C'est ce qui sera étudié dans ce chapitre.

Renforcement

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier (augmentation de la ductilité, de la résistance) d'une construction pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre des sollicitations dont il n'a pas été tenu compte dans les calculs. Un renforcement peut être associé à une réparation

Le renforcement regroupe l'ensemble des dispositions susceptibles de diminuer la vulnérabilité d'un bâtiment au séisme. Ces dispositions relèvent d'une étude détaillée des technologies de renforcement.

Selon le cas, les modes de renforcement diffèrent sensiblement :

-renforcement d'une structure par la création d'une ossature complémentaire (béton armé ou charpente métallique) destiné à se substituer, en partie ou en totalité, à l'ouvrage déficient pour le transfert des efforts sismiques.

-renforcement des éléments structuraux par la reconstitution et/ou l'adjonction d'éléments.

-réduction de l'action sismique par l'interposition des isolateurs.

-utilisation concomitante de plusieurs renforcements à choisir parmi ceux décrits ci-après.

Quelle que soit la solution de renforcement, il est conseillé de ne pas dépasser pour le coefficient de comportement la valeur $q \leq 2$

Types de renforcement

Depuis leur apparition sur le marché comme matériaux de renforcement des structures existantes, dans les années 1990, les composites en PRF offrent plusieurs avantages : ils sont parfaitement immunisés contre la corrosion et offrent un rapport résistance-poids très élevé.

De plus, les PRF offrent des possibilités quasi-infinies quant à leur disponibilité variée et leur facilité de mise en place. Le renfort en PRF est constitué de fibres qui sont liées entre elles par une résine polymère (matrice). Il se présente sous forme de lamelles ou de tissus. Les lamelles, un composite extrudé par tirage, offrent l'avantage d'un meilleur contrôle de fabrication et de pose, mais ne peuvent être utilisées que sur une surface à plat. Les tissus, beaucoup plus flexibles, peuvent être utilisés sur presque toutes les surfaces (plate, ronde, ovale, etc.), mais sont généralement plus difficiles à installer (**Germain, 2021**).

Renforcement avec des barres

Les propriétés du composite sont principalement influencées par le choix des fibres. Dans le génie civil, trois types de fibres dominent. Il s'agit de fibres de carbone, de verre et d'aramide, et le composite est souvent nommé par la fibre de renforcement, p. ex., PRFC pour Polymère renforcé de Fibre de Carbone. Ils ont des propriétés différentes, y compris le prix, qui rendent l'un plus approprié que l'autre à des fins différentes. À des fins de renforcement, les fibres de carbone sont les plus appropriées et seront donc concentrées dans ce qui suit. Toutes les fibres ont généralement une capacité de contrainte plus élevée que l'acier ordinaire et sont élastiques linéaires jusqu'à la défaillance. Les propriétés les plus importantes qui diffèrent entre les types de fibres sont la rigidité et la traction (**Carolin, 2003**).

Types de fibres utilisées dans les composites polymères renforcés de fibres

- Fibres de carbone
- Fibres de verre
- Fibres aramides

Barres en carbone (PRFC)

Les fibres de carbone ont un module d'élasticité élevé de 200 -800GPa. L'allongement final est de 0,3 2,5 % lorsque l'allongement inférieur correspond à la rigidité supérieure et vice versa. Les fibres de carbone n'absorbent pas l'eau et résistent à de nombreuses solutions chimiques. Ils résistent très bien à la fatigue, ne se corrodent pas et ne présentent pas de fluage ou de relaxation, ayant moins de relaxation que les torons d'acier à précontrainte à haute

résistance. La fibre de carbone est conductrice sur le plan électrique et, par conséquent, peut provoquer une corrosion galvanique en contact direct avec l'acier (**Carolin, 2003**).

La fibre de carbone est le plus cher des renforts les plus courants, mais dans les applications spatiales, la combinaison d'excellentes caractéristiques de performance et de poids léger en font un renfort indispensable dont le coût est d'une importance secondaire. Les fibres de carbone sont constituées de petite cristallite de graphite turbostratique. Ceux-ci ressemblent à des monocristaux de graphite sauf que les plans de couche ne sont pas emballés dans un mode le long de la direction c - axe. Dans un seul cristal de graphite, les atomes de carbone dans un plan basal sont disposés en rangées hexagonales et maintenus ensemble par de fortes liaisons covalentes. Entre les plans basaux seulement faibles. Par conséquent, les monocristaux sont très anisotropiques avec le module plan de l'ordre de 100GPa alors que les molécules perpendiculaires au plan basal ne sont que d'environ 75GPa. Il est donc évident que pour produire des fibres à haut module et à haute résistance, les plans de base du graphite doivent être parallèles à l'axe des fibres. Ils ont des coefficients de dilatation thermique plus faibles que les fibres de verre et d'aramide. La fibre de carbone est un matériau anisotrope, et son module transversal est d'un ordre de grandeur inférieur à son module longitudinal. Le matériau a une très grande résistance à la fatigue et au fluage. Depuis sa résistance à la traction diminue avec l'augmentation du module.

Sa contrainte à la rupture sera également beaucoup plus faible. En raison de la fragilité du matériau à un module plus élevé, il devient critique dans les détails d'articulation et de connexion, qui peuvent avoir des concentrations de contraintes élevées. En raison de ce phénomène, les stratifiés en composite de carbone sont plus efficaces avec le collage qui élimine les attaches mécaniques (**Nishikant, 2009**).

a-Utilisation

Différents cas de renforcement de structures (**Sika France SAS, 2022**) :

a.1-Augmentation de charges

- Augmentation de la capacité portante des poutres, des dalles : augmentation des charges d'exploitation, trafic, changement de destination du local, etc.

a.2-Endommagement des éléments de structures

- Dégradation des matériaux de la structure
- Corrosion, diminution ou sectionnement d'armatures internes
- Accidents (impact de véhicule, séisme, incendie, etc.)

a.3-Amélioration des conditions de service et de durabilité

- Réduction de flèche et d'ouverture de fissure
- Réduction des contraintes dans les armatures internes
- Amélioration de la résistance/tenue à la fatigue de la structure

a.4-Modification de la structure

- Création de trémies (voile, dalle, poutre, etc.)
- Suppression de murs, poteaux

a.5-Renforcement préventif

- Renforcement parasismique (Eurocode8)
- Impact, explosion, etc.

a.6-Défauts de conception, défauts de calcul

- Insuffisance ou déficience des sections d'acier interne
- Défaut de positionnement des armatures dans le béton

b- Avantages

- Insensible à la corrosion
- Très haute performance
- Excellente durabilité et résistance/tenue à la fatigue
- Facile à transporter, à manipuler in-situ (légèreté)
- Invisible une fois installée (engravée dans le béton / protégée naturellement)
- Application rapide et économique
- Peu de préparation de surface du support / nivellement des irrégularités
- Surface renforcée circulaire (barre engravée, non exposée aux actions mécaniques extérieures)
- Solution de renforcement reconnue internationalement (**Sika France SAS, 2022**).

Barres en verre (PRFV)

Les fibres de verre sont considérablement moins chères que les fibres de carbone et les fibres d'aramide. Par conséquent, les composites de fibre de verre sont devenus populaires dans de nombreuses applications, l'industrie nautique par exemple. Les modules des fibres sont de 70 à 85GPa avec un allongement final de 2 à 5 % selon la qualité. Les fibres de verre sont sensibles à la corrosion sous contrainte à des niveaux de contrainte élevés et peuvent avoir des problèmes de relaxation. Les fibres de verre sont sensibles à l'humidité, mais avec le bon choix de matrice, les fibres sont protégées (**Carolin, 2003**).

Barres en Aramide (PRFA)

L'aramide est l'abréviation de polyamide aromatique. Une marque bien connue de fibres d'aramide est Kevlar mais il existe d'autres marques aussi. Les modules des fibres sont de 70 - 200GPa avec un allongement final de 1,5 - 5 % selon la qualité. L'aramide a une énergie de fracture élevée et est donc utilisé pour les casques et les vêtements pare-balles. Les fibres aramides sont sensibles aux températures élevées, à l'humidité et au rayonnement ultraviolet et ne sont donc pas largement utilisées dans les applications de génie civil. De plus, les fibres d'aramide ont des problèmes de relaxation et de corrosion sous contrainte (**Carolin, 2003**).

Renforcement avec des plaques

Renforcement par collage de plaques composites

La plupart des renforts composites utilisés dans le génie civil sont des composites carbone – époxyde ou verre – époxyde. Leurs performances mécaniques spécifiques sont en effet supérieures à celles de l'acier, principalement la résistance à la traction et en compression. Les avantages de l'utilisation de composites sont nombreux. On peut citer par exemple leur grande résistance à la fatigue, leur orientation. Dès lors, les études sur l'utilisation de matériaux composites pour la réhabilitation se sont multipliées pour mieux comprendre les problèmes posés par cette nouvelle technique (**Ferrier et al, 1999**).



Figure 2.1: Renforcement par collage de plaques composites.

Les structures doivent souvent être réparées ou renforcées, et il existe diverses méthodes.

Malheureusement, la résistance à la traction n'augmente pas de la même manière au fil du temps. Cela signifie que la capacité portante des structures en béton est souvent limitée par la quantité d'armature. En ajoutant du renfort en le liant à la surface, la capacité portante peut dans de nombreux cas être augmentée. De nos jours, la plaque collée est principalement une feuille ou un stratifié de polymère renforcé de fibres, mais cela n'a pas toujours été le cas, comme nous le verrons plus loin .

a-Collage des plaques FRP

Le collage de plaques FRP peut être divisé en trois types : le collage de plaques stratifiées, la méthode de pose manuelle, et l'armature montée près de la surface, NSMR. Le collage de plaques stratifiées implique qu'un stratifié composite préfabriqué, souvent pulvérisé, est collé à la surface d'une structure en béton. **Wiberg (2000)** a étudié si un mélange cimentaire peut être utilisé comme matrice pour la pose à la main. Pour NSMR, les rainures sont découpées dans le couvercle en béton et les tiges composites sont collées dans la rainure NSMR avec des tiges quadratiques CFRP a été développé à l'Université de technologie de Lulea.

Les processus de renforcement pour les trois types de collage de plaques FRP sont différents à certains égards. Cependant, ils sont tous décrits en gros et impliquent trois moments principaux : la préparation, le collage FRP et l'achèvement .

a.1-Préparation

Avant de renforcer une structure, il faut prendre certaines mesures. La préparation variera selon le type de renforcement choisi. Mais certaines étapes sont communes. Si l'armature intérieure présente une corrosion importante ou si les chlorures contaminent fortement le béton, les barres corrodées et le béton doivent être enlevés et remplacés pour éviter que le revêtement de béton ne s'écaille. Lors du renforcement sur le terrain, il peut également y avoir des dommages causés par des impacts de véhicules et des erreurs lors de la construction qui doivent être prises en compte. La **Figure 2.2** montre comment des trous et des cavités mineurs ont été réparés avec du mastic, puis broyés.



Figure 2.2 : Réparation avec du mastic.

a.2-Collage FRP

Après la préparation, le système de renforcement peut être appliqué. Pour la pose manuelle, le travail de renforcement commence par l'application de l'adhésif sur la surface préparée avec un rouleau.

Ensuite, les fibres sont mises en place. Un rouleau est utilisé pour redresser les fibres et pour éliminer tous les vides plus grands. Normalement, il y a une couverture en papier ou en plastique sur les fibres pour faciliter la manipulation. Dans le cas où de nombreuses couches sont nécessaires, les dernières étapes sont répétées jusqu'à ce que l'épaisseur désirée soit atteinte epoxy.

Le collage des plaques de laminâtes commence par le remplissage des irrégularités dans la surface avec du mastic. La grande résine Viscosité utilisée pour le collage du laminât. L'époxy est ensuite appliquée sur le stratifié et le stratifié EST mis en place Pressura est appliqué sur le stratifié à l'aide d'un rouleau ou à la main de sorte que le collage FRP à l'époxy soit réparti de façon uniforme avec une mise en place à la main est et la plaque laminée illustré dans la **Figure 2.3**.



Figure 2.3 : Collage des plaques en FRP.

a.3- Achèvement

Les travaux d'achèvement sont principalement entrepris pour des raisons de durabilité et d'esthétique, Pour protéger la matrice contre les rayons UV, le renforcement peut être peint, ce qui peut également améliorer les performances esthétiques. La couleur peut être choisie pour camoufler le renforcement sur la structure, camoufler la structure dans son environnement ou donner un aspect plus coloré dans l'environnement S'il est nécessaire de protéger le composite contre le feu, Protection spéciale contre les fibres Recouvrement par solide renforcement Autres travaux de finition légers dus aux exigences de surface La protection de l'environnement peut être arrangée en pulvérisant du sable de quartz sur la dernière couche d'époxy non traitée à partir de la pose manuelle (Taljsten et al, 1997).

b- Vérification de la qualité

Le succès d'un renforcement dépend d'une bonne exécution, Il existe certaines mesures qui peuvent être prises pour minimiser le risque de mauvaise qualité du renforcement interne La qualité du béton à la surface peut être mesurée par traction-de contrôle La régularité de la surface peut être mesurée avant le renforcement appliqué La réaction de l'époxy ne sera pas satisfaisante si la température est trop basse ou si l'humidité relative est trop élevée niveaux pouvant être mesurés .Les exigences qui doivent être remplies.

L'humidité relative sur la surface du béton ne doit pas dépasser 80 % au moment de l'application de l'apprêt, de l'époxy et de la peinture.

La température dans l'air doit être d'au moins 3 Couvrir le point de rosée réel, et ne doit pas être inférieure à 10 C.

Fournisseurs fiables devraient toujours être suivis. Si les demandes de durcissement ne sont pas remplies des arrangements spéciaux sont nécessaires.

Tentes et ventilateurs de chauffage peuvent être utilisés pour créer l'environnement requis.

Après renforcement, une fois l'adhésif durci, il est possible de détecter les vides sous les fibres en tapant une pièce sur la surface de la fibre.

Le son généré par le taraudage est différent si les vides sont piégés par rapport à un bon lien. Les vides et le désossage peuvent également être détectés par thermographie infrarouge.

En utilisant des sources de chaleur et des caméras infrarouges, les vides peuvent être détectés par les différences de température entre les zones collées et décollées qui se produisent en raison de différents transferts de chaleur .

c- Avantages et inconvénients

Comme avantages Dans certains cas, la méthode peut être utilisée sans restriction de la circulation sur le pont.

Autres avantages : Un faible poids des fibres facilite la manipulation sans équipement de levage sur le site. Changements négligeables de section, de poids et de hauteur libre d'une structure. Facile à appliquer.

Il existe également des inconvénients, tels que Sans protection, le renforcement est sensible au feu et à l'impact, Les consultants de conception, les entrepreneurs et les clients ont une expérience limitée.

Selon la structure qui sera renforcée, différents aspects pourraient se présenter. Pour toutes les méthodes de renforcement, il est de la plus haute importance de comprendre comment le renforcement affectera la structure finale .

abrication de plaques de PRV (GFRP)

Pour répondre au large éventail de besoins qui peuvent être requis dans la fabrication de composites, l'industrie a évolué four une douzaine de processus de fabrication séparés ainsi qu'un certain nombre de processus hybrides. Chacun de ces procédés offre des avantages et des avantages spécifiques qui peuvent s'appliquer à la fabrication de composites. La pose à la main - vers le haut et la pulvérisation - vers le haut sont deux processus de base.

La pose à la main - vers le haut est la méthode de fabrication la plus ancienne, la plus simple et la plus intense. Le processus est le plus courant dans la construction maritime FRP. La résine liquide est placée avec le renfort (fibre de verre tissée) contre la surface finie d'un

moule ouvert Les réactions chimiques dans la résine durcissent le matériau en un produit solide et léger. La résine sert de matrice pour les fibres de verre de renforcement Le pourcentage de fibres et de matrices était de 50:50 en poids. Les matériaux constitutifs suivants ont été utilisés pour la fabrication de la plaque :

1. E - verre tissé comme renfort
2. Époxy comme résine
3. Durcisseur comme diamine (catalyseur)
4. Alcool polyvinylique comme agent de libération.

Moulage par contact dans un moule ouvert à la main - jusqu'à a été utilisé pour combiner des couches de stratifié tissé dans l'ordre prescrit. Une plateforme plate en contreplaqué rigide a été choisie. Une feuille de plastique a été conservée sur la plate-forme de contreplaqué et une mince pellicule d'alcool polyvinylique a été appliquée comme agent de libération à l'aide d'un pistolet pulvérisateur. Le laminage commence par l'application d'une couche de gel (époxy et durcisseur) déposée sur le moule par une brosse, dont le but principal était de fournir une surface externe lisse et de protéger les fibres contre une exposition directe à l'environnement. La couche a été coupée à partir d'un rouleau de tissu stratifié. Des couches de renfort ont été placées sur le moule au-dessus de la couche de gel et la couche de gel a été appliquée à nouveau par brosse. Tout air pouvant être emprisonné a été retiré à l'aide de rouleaux d'acier dentelés. Le processus de pose de la main - vers le haut était la suite du processus ci-dessus avant que la couche de gel ait complètement durci.

Encore une fois, on a recouvert le dessus de la plaque d'une feuille de plâtre en appliquant de l'alcool de polyvinyle à l'intérieur de la feuille comme agent de libération. Ensuite, une plate-forme métallique lourde et plate-forme rigide a été conservée sur la plaque pour la compression, dans le but. Les plaques ont été laissées pour un minimum de 48 heures avant d'être transportées et câble forme exact pour l'essai (**Nishikant, 2009**).

Renforcement avec en tissu

Tissu de fibres de carbone (TFC)

a-Définition

Le procédé TFC est un procédé breveté de renforcement structurel par collage d'armatures additionnelles à base de fibres de carbone.

Le procédé est basé sur le principe d'un placage de matériau résistant aux efforts de traction et judicieusement collé sur les zones tendues de la pièce à renforcer pour en augmenter les performances de fonctionnement. Le procédé TFC a essentiellement un rôle de renforcement structurel aux efforts engendrés par les effets de flexion comme d'efforts tranchants.

Le TFC est un composite à base de fibres de carbone matricées dans un liant synthétique appliquée à froid dans le but d'être intégré par adhérence au support pour former le complément d'armature de renforcement désiré. Le composite ainsi obtenu rivalise par ses caractéristiques mécaniques avec les meilleurs aciers sans avoir les inconvénients des effets de la corrosion.

Les avantages de fabriquer le composite directement sur le support sont de pouvoir mouler la forme exacte de la pièce à renforcer, de ne pas manier de plaques lourdes ou encombrantes, de ne pas avoir d'autre interface de collage avec le support que la matrice même du composite, et donc de ne pas générer de concentration de cisaillement pouvant provoquer des amorces de décollement dans les zones de faible épaisseur de résine.

Par sa simplicité de mise en œuvre, l'absence de pression à exercer durant la pose et le durcissement de la colle, fait du TFC est un système de renforcement économique (Abdelhamid, 2021).



Figure 2.4 : Tissu de fibres de carbone (TFC).

Domaine d'application

- Ouvrages d'art
- Bâtiments (société Freyssinet, 2009).

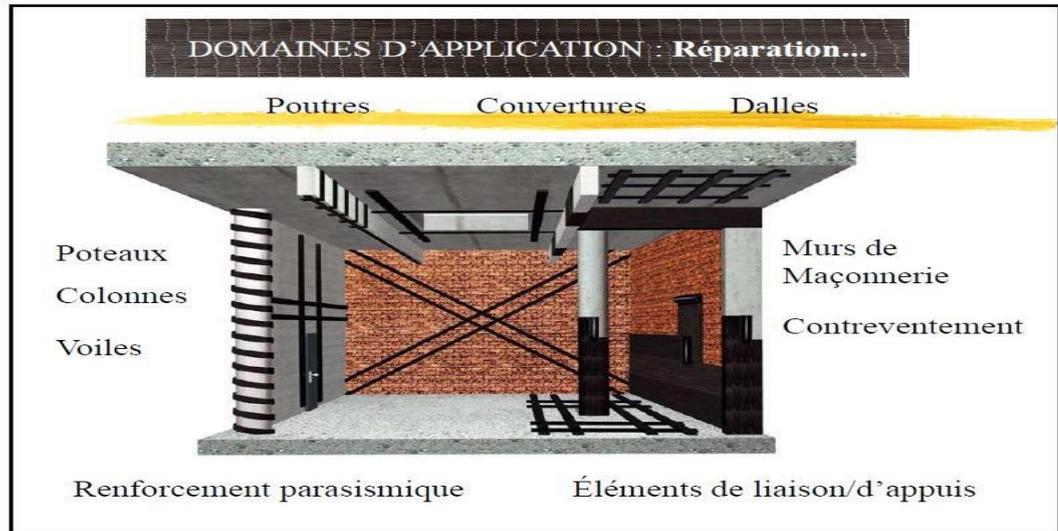


Figure 2.5 : Domaine d'application de Tissu de fibres de carbone.

c- Mise en œuvre

La mise en œuvre du composite directement sur le support permet de mouler la forme exacte de la pièce à renforcer, de ne pas manier des plaques lourdes ou encombrantes, de ne pas avoir d'autre interface de collage avec le support que la matrice même du composite, et donc de ne pas générer de concentration de cisaillement pouvant provoquer des amorces de décollement dans les zones de faible épaisseur de résine (**Freyssinet, 2009**).

d- Avantages du TFC

- Résistance et module élastique élevés,
- Insensibilité à la corrosion,
- Légèreté,
- Grande souplesse de mise en œuvre sur des surfaces de toute forme et de toute nature,
- Excellente résistance à la fatigue et à l'abrasion.

e-Inconvénients

Le comportement transversal des fibres est relativement mauvais ;

- Le matériau, de par sa nature isotrope conduit a des comportements complexes, et donc a des difficultés de modélisation et de conception. De plus, lors des expérimentations, cela complexifie également l'identification des propriétés du matériau ;
- La fibre de carbone possède de plus une mauvaise résistance aux chocs et à l'abrasion ;
- La conductivité élevée du matériau peut conduire à des électrocutions, comme lorsqu'il est utilisé pour la construction d'un mat de voilier
- Fragilité à la courbure ou au pliage ;
- Coût élevé ;
- Fragilité au choc.

f-Pose de TFC

➤ Préparation avant mise en œuvre:

1/-Préparation du support

- Le support doit être sec
- Le support doit être sain et propre des produit non adhérents et d'enduit de type peinture.
- Une élimination des surfaces qui offre un peu de cohésion, et une préparation de cette surface doit être faite afin de créer une rugosité suffisante

2/- Préparation du tissu de fibre de carbone

- Découper soigneusement les tissus ;
- Les tissus coupés rester à plat ou enroulés, pour éviter l'endommagement des
Fibres ;
- Tenir hors poussière

3/- Préparation de la résine

- Homogénéiser chaque composante séparément ;
- Verser le durcisseur dans la résine ;
- Mélanger cette dernière avec un agitateur mécanique jusqu'à obtenir un mélange uniforme.

Fig 2.6 : Mise en place du confinement par tissu TFC



Application d'une couche de résine



Pose des bandes de TFC



Marouflage au rouleau



Pose d'une couche de résine de couverture

➤ Mise en œuvre

- **Mise en œuvre de la résine**

L'application de la première couche de résine à l'aide d'un rouleur sur le support déjà préparé.

- **Mise en place du tissu**

Le placement du tissu sur la couche de résine, en prenant attention à l'orientation des fibres et à l'étirement excessif des tissus

Tissu en fibres en verre

a- Historique

Vers les années 1960, des recherches portent sur la possibilité de traiter le verre standard (verre E) afin de le rendre stable en milieu alcalin. La société Pilkington achète les droits de cette nouvelle fibre de verre Alkali Résistante (AR), développée par Madjumdar. En plus d'un traitement au zirconium, les fibres d'un diamètre de 10 à 12 μm sont réunies entre elles par centaines puis ensimées. Cette opération protège les fibres de l'abrasion durant le malaxage et contre le développement excessif de cristaux agressifs à leur surface. Pilkington développe au début des années 1970 des procédés de fabrication pour ces produits ciment/fibres (GRC de l'anglais *Glass Reinforced Cement*) en s'inspirant de l'industrie des plastiques renforcés.

Le développement rapide des GRC depuis les années 1970 a conduit à l'élaboration d'un nouveau système breveté système Vetrotex-Saint-Gobain, développé en partenariat par le Centre de Recherche de Pont-à-Mousson et Vetrotex. Ce matériau est composé de fibre de verre AR dans un mélange de ciment, de polymères, d'adjuvants et d'ajouts spécifiques. Les faibles performances (fragilité, résistance en traction) du liant hydraulique sont compensées par l'utilisation de fibres de renfort afin de reprendre l'effort après la rupture de la matrice cimentaire.

L'interaction entre ces deux matériaux est conditionnée par l'ensimage des fibres. L'interface régule les phénomènes de mouillage et de pénétration des fibres par la matrice, afin d'obtenir un transfert de charge satisfaisant. La macro-fissure de la matrice est reprise par les fibres qui viennent ponter la fissure et répartir l'endommagement au travers de multiples microfissures. Une forte réserve de déformation est ainsi obtenue et les propriétés de matériau vont dépendre de plusieurs facteurs tels que la quantité et la longueur du renfort, la compacité de la matrice, etc. (Geoffrey, 2014).



Figure 2.7 : Tissu en fibres en verre.

b-Description

La toile de verre fait partie de la grande famille des revêtements muraux. Commercialisée sous la forme de rouleaux, elle est l'un des nombreux produits dérivés du verre. En effet les fibres de verre extrêmement fines, qui la composent et lui assurent sa solidité, sont fabriquées par étirement, lorsque le verre est rendu malléable à haute température. C'est le tissage de ces fibres de verre qui donne à la toile de verre son aspect si particulier et imprime sa surface de reliefs (**Finess, 2011**).

c-Propriété

La fibre de verre est intéressante à plus d'un titre. Ainsi elle permet des réductions de poids en perfectionnant les performances, pour un prix compétitif : on peut en faire une fabrication en séries. Elle permet par exemple un allègement des structures d'environ 30 % comparé à l'acier.

Parmi les autres propriétés, citons l'inertie chimique, la résistance aux chocs, l'isolation, etc (**Wikibis, 2022**).

d-Utilisation

Les principales utilisations de la fibre sont, par ordre d'importance (**Finess, 2011**) :

1. Les bâtiments et les infrastructures ;
2. Les transports ;
3. L'électricité et l'électronique ;
4. Les sports et loisirs ;
5. Les équipements industriels.

caractéristiques :

- Résistant aux chocs et indéformable
- Non irritant
- Facile à appliquer
- Particulièrement inflammable.

application

La technologie de collage des murs avec ce type de papier peint est très simple. Cependant, il y a quelques points à prendre en compte (**Recommann, 2022**):

1. C'est une erreur de penser que les côtés de la nappe fibreuse sont les mêmes. En règle générale, les rouleaux de fibre de verre sont enroulés à l'envers.
2. N'oubliez pas de travailler avec des bandes de papier peint avec des gants et des manches longues. Cela est particulièrement vrai du processus de découpe du papier peint en larges bandes, car la fibre de verre s'effrite et si elle entre en contact avec la peau, elle peut provoquer une irritation.
3. Pour coller des murs avec de la fibre de verre, vous devez utiliser de la colle pour le papier peint épais. Sa base est l'amidon, traité d'une manière spécifique spéciale.
4. N'oubliez pas qu'avant de coller ce type de papier peint, il est nécessaire d'appliquer un apprêt sur les murs ou de traiter la toile au préalable avec une solution de colle faible.

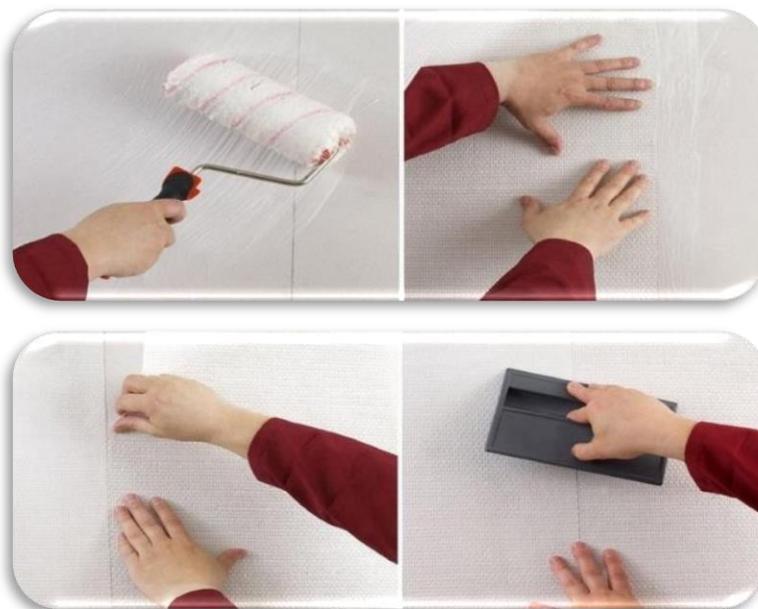


Figure 2.8 : Technologie d'application de tissu de fibre de verre.

g- Avantages

Le tissu en fibre de verre ainsi que le tissu en fibre de verre résineux sont tout d'abord une solution parfaite pour masquer les irrégularités qui peuvent se présenter sur les murs et les plafonds. Aussi, le tissu en fibre de verre est en mesure de cacher les éventuelles petites fissures. Par ailleurs, la toile de verre est un petit plus en matière d'isolation phonique et thermique, mais cela dépend de la qualité choisie. Elles peuvent également être peintes et repeintes autant de fois qu'on le souhaite (**Finess, 2011**).

h-Inconvénients

- La fibre de verre est plus difficile à réparer que le bois ;
- Sa dégradation sera rapide si de l'eau parvient à s'infiltrer sous la couche de fibre de verre ;
- La fixation à la structure doit se faire le dessous ce qui peut rendre l'installation difficile dans les espaces ;
- Restreints.

Conclusion

Les trois types de renforcement principaux ont été discutés dans ce chapitre. La méthode de renforcement par des plaques est le sujet de cette recherche. Le chapitre suivant sera présenté un modèle numérique de renforcement des poutres en béton armé. Le matériau PRFC est utilisé.

CHAPITRE III

**Analyse des contraintes interfaciales d'une poutre
en béton renforcée par une plaque en matériau composite**

III.1 Résumé:

Dans le présent travail, nous exposons une solution analytique explicite de calcul des contraintes interfaciales et de déformations verticales des poutres renforcées à leur face inférieure tendue par des plaques en matériaux composites. Cette méthode prend en compte les déformations de cisaillement (shear-lag) de la poutre et de la plaque en utilisant le modèle de Tounsi (2009). Trois cas de charges appliquées à cette poutre (Charges réparties, charges concentrées et charges double concentrées) sont étudiés. Pour valider cette solution, nous avons mené une étude paramétrique qui prend en compte le niveau de la force de précontrainte, les propriétés géométriques et mécaniques de la plaque de renforcement. Les résultats obtenus montrent que les propriétés géométriques et mécaniques ont une influence sur la rigidité et la capacité portante de la poutre renforcée, par contre l'augmentation de la force de précontrainte n'affecte pas la rigidité de la poutre mais accroît la capacité portante.

III.2 Introduction:

Le renforcement des poutres en béton ou en acier par collage des plaques en matériaux composites (FRP, CFRP ou GFRP) non précontraintes a été utilisé comme moyen assez efficace pour réhabiliter ou de mettre à niveau des ouvrages d'arts ne répondant pas aux normes en vigueur. Cependant, les charges permanentes ne sont pas transmises dans l'élément de renforcement (plaque collée dans la partie inférieure tendue et la plaque de renforcement) et donc ce mode de renforcement n'agit que contre les charges d'exploitation. Le renforcement par des plaques en FRP précontraint prend en compte une partie des charges permanentes. Le renforcement des structures en béton ou en acier par des plaques en FRP non précontraintes a reçu une attention particulière de la part des chercheurs aussi bien expérimentale qu'analytique [1-25]. Il existe dans la littérature des études théoriques et expérimentales qui ont été menées sur le renforcement des poutres par des plaques précontraintes et ont montré l'efficacité de ce système sur l'accroissement sur la capacité portante [19-21]. Cependant, aucune recherche théorique n'a été abordée sur l'étude de la performance de la flexion des poutres en béton renforcées par des plaques précontraintes. Dans le présent travail, nous avons utilisé un modèle qui prend en compte l'effet de déformation du cisaillement de la plaque de renforcement précontrainte, contrairement à l'étude menée par Gaafori et All sur le renforcement de la poutre en acier, pour modéliser l'effet de la précontrainte sur la rigidité et la flexion du système.

III.3 Modélisation de la poutre renforcée :

Considérons un élément infinitésimal dx de la poutre en béton renforcée par une plaque en FRP (Fig. 3.1) comme il est montré dans la figure 3.2. La poutre étudiée est composée de trois matériaux : béton, couche adhésive et renfort FRP. Dans le présent travail, le comportement

élastique linéaire est considéré comme valable pour tous les matériaux ; l'adhésif est supposé jouer uniquement un rôle de transfert des contraintes du béton vers la plaque en FRP et les contraintes dans la couche adhésive ne varient pas à travers l'épaisseur.

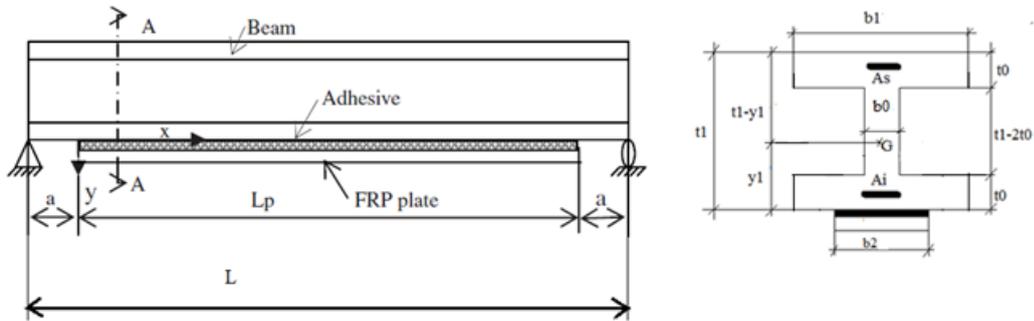


Figure3. 1: Poutre renforcée simplement appuyée sur ses appuis simples.

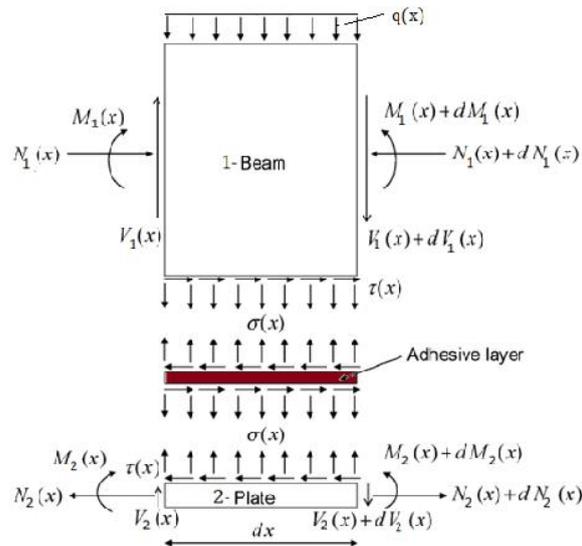


Figure 3.2. Élément infinitésimal de la poutre renforcée

III-4 Formulation mathématique des équations des contraintes interfaciales et des déformations verticales de la poutre renforcée

III-4.1 Hypothèses fondamentales :

1. Tous les matériaux utilisés obéissent à la Hooke.
2. Les hypothèses Navier-Bernoulli sont applicables à la poutre étudiée.
3. La liaison poutre-plaque est considérée comme parfaite (aucun glissement n'est autorisé entre la poutre et la plaque).
4. La poutre et la plaque ont la même courbure.
5. Les contraintes interfaciales, normales et de cisaillement, sont considérés comme constantes à travers l'épaisseur de l'adhésif.
6. Le moment de flexion dans la couche d'adhésive est considéré comme négligeable.

III-4.2 Equations différentielles de contraintes interfaciales de cisaillement :

Les déformations longitudinales totales dans les parties supérieure et inférieure de la couche d'adhésive $\varepsilon_i(x)$ sont obtenues à partir des déformations axiales $\varepsilon_i^N(x)$ et des déformations dues aux moments fléchissants $\varepsilon_i^M(x)$. Pour déterminer les déformations longitudinales inconnues " $\varepsilon_1^N(x)$ " et " $\varepsilon_2^N(x)$ ", un nouveau modèle de déformations de cisaillement de l'adhérent a été intégré dans cette analyse.

$$\varepsilon_i(x) = \frac{du_i(x)}{dx} = \varepsilon_i^N(x) + \varepsilon_i^M(x) \quad i = 1; 2 \quad (1)$$

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \varepsilon_1^N(x) + \varepsilon_1^M(x) \quad (2)$$

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = \varepsilon_2^N(x) + \varepsilon_2^M(x) \quad (3)$$

E est le module d'élasticité et I est le moment quadratique de la section. Les indices 1 et 2 désignent respectivement l'adhérent 1 et l'adhérent 2. $M_i(x)$ est le moment de flexion tandis que les y_i sont les distances du bas de l'adhérent 1 et du haut de l'adhérent 2 à leurs centroïdes respectifs

Les déformations longitudinales de la poutre et de la plaque de renforcement en FRP sont notées par $\varepsilon_1^N(x)$ et $\varepsilon_2^N(x)$ à l'interface adhésive. Elles sont dues aux forces longitudinales $N_i(x)$.

Du fait que les contraintes de cisaillement sont nulles aux bords libres supérieur et inférieur de la poutre renforcée, en utilisant la méthode développée par Tounsi et all, et on suppose une variation parabolique du déplacement $U_i^N(x, y)$ des fibres à travers l'épaisseur de la plaque et de la poutre et après différentes opérations algébriques, on obtient les déformations axiales $\varepsilon_i^N(x)$ qui prennent en compte des

déformations de cisaillement (shear-lag) aux bords inférieur et supérieur respectivement de la poutre et de la plaque. Ces opérations algébriques seront développées dans la méthode exposée ci-dessus

III-5 Méthode de détermination des déformations longitudinales.

Les déplacements longitudinaux dans les deux adhérents $U_1^N(x, y)$ et $U_2^N(x, y)$ sont représentés par une fonction parabolique de second degré en y pour l'adhérent 1 et y' pour l'adhérent 2.

$$U_1^N(x, y) = A_1(x) \cdot y^3 + B_1(x) \cdot y + C_1(x) \quad (4)$$

$$U_2^N(x, y) = A_2(x) \cdot y^3 + B_2(x) \cdot y + C_2(x) \quad (5)$$

Les contraintes de cisaillement dans les deux adhérents sont données par :

$$\sigma_{xy}(1) = G_1 \cdot \gamma_{xy}(1) \quad (6)$$

$$\sigma_{xy}(2) = G_2 \cdot \gamma_{xy'}(2) \quad (7)$$

Les déformations de cisaillement de l'adhérent sont exprimées comme suit :

$$\gamma_{xy}(i) = \frac{dU_i^N}{dy} + \frac{dW_i^N}{dx}; i = 1, 2 \quad (8)$$

Où G_1 et G_2 sont les modules de cisaillement transversal des adhérents 1 et 2, respectivement. En négligeant les variations du déplacement transversal W_i^N (induites par les forces longitudinales $N_i(x)$), avec la coordonnée longitudinale x :

$$\gamma_{xy}(i) = \frac{\partial W_i^N}{\partial x} \approx 0 \quad (9)$$

$$\gamma_{xy}(i) = \frac{dU_i^N}{dy} \quad (10a)$$

$$\gamma_{xy}(i) = 3 \cdot A_i(x) \cdot y^2 + B_i(x); i = 1, 2 \quad (10b) \quad \sigma_{xy}(1) = G_1 \cdot$$

$$3 \cdot A_i(x) \cdot y^2 + B_i(x); i = 1, 2 \quad (10c)$$

Les contraintes de cisaillement doivent satisfaire les conditions suivantes :

$$\sigma_{xy(1)}(x, t_1) = \sigma_{xy'}(x, t_1) = \tau(x) = \tau_a \quad (11)$$

$$\sigma_{xy(1)}(x, 0) = \sigma_{xy'}(x, t_2) = 0 \quad (12)$$

Où t_1 et t_2 sont les valeurs d'épaisseur des adhérents 1 et 2, respectivement. La condition (11) découle de la continuité et de l'hypothèse de contraintes de cisaillement uniformes à travers l'épaisseur de l'adhésif. La condition (12) stipule qu'il n'y a pas de contrainte de cisaillement à la surface supérieure de l'adhérent 1 (c'est-à-dire à $y=0$) et à la surface inférieure de l'adhérent 2 (c'est-à-dire à $y'=t_2$). Ces conditions conduisent aux expressions suivantes : _____

$$\sigma_{xy}(1) = \frac{\tau(x)}{t_1^2} \cdot y^2 \quad (13)$$

$$\sigma_{xy'}(2) = \left(1 - \frac{y'^2}{t_2^2}\right) \cdot \tau(x) \quad (14)$$

Ensuite, avec une relation constitutive de matériau linéaire, les déformations de cisaillement des deux

adhérents, y_1 pour l'adhérent 1 et y_2 pour l'adhérent 2, sont exprimées comme suit :

$$\gamma_{xy}(1) = \gamma_1 = \frac{\tau_a}{G_1 \cdot t_1^2} \cdot y^2 \quad (15)$$

$$\gamma_{xy'}(2) = \gamma_2 = \frac{\tau_a}{G_2} \cdot \left(1 - \frac{y'^2}{t_2^2}\right) \quad (16)$$

Les fonctions de déplacement longitudinal, U_1^N pour l'adhérent 1 et U_2^N pour l'adhérent 2, dues aux forces longitudinales, sont données par :

$$U_1^N(y) = U_1^N(0) + \int_0^y \gamma_1(y) dy = U_1^N(0) + \frac{\tau_a}{3 \cdot G_1 \cdot t_1^2} \cdot y^3 \quad (17)$$

$$U_2^N(y') = u_2^N + \int_0^{y'} \gamma_2(y') dy' = u_2^N + \frac{\tau_a}{G_2} \cdot \left(y' - \frac{y'^3}{3 \cdot t_2^2}\right) \quad (18)$$

$U_1^N(0)$ représente le déplacement à la surface supérieure de l'adhérent 1 (dû aux forces longitudinales $N_1(x)$), et U_2^N représente le déplacement adhésif induit par la force longitudinale $N_2(x)$ à l'interface entre l'adhésif et l'adhérent 2. Le déplacement des fibres à la base inférieure de l'adhérent 1 u_1^N est donné par l'expression suivante :

$$u_1^N = U_1^N(y = t_1) = U_1^N(0) + \frac{\tau_a \cdot t_1}{3 \cdot G_1} \quad (19)$$

Les équations (17) et (18) peuvent être réécrites comme suit :

$$U_1^N(y) = u_1^N + \frac{\tau_a}{3 \cdot G_1 \cdot t_1^2} \cdot y^3 - \frac{\tau_a \cdot t_1}{3 \cdot G_1} \quad (20)$$

$$U_2^N(y') = u_2^N - \frac{\tau_a}{3 \cdot G_2 \cdot t_2^2} \cdot y'^3 + \frac{\tau_a \cdot y'}{G_2} \quad (21)$$

La force longitudinale résultante ΔN_2 , pour l'adhérent inférieur est :

$$\Delta N_2(x) = N_2(x) - N_0 \quad (22)$$

$$\Delta N_2(x) = b_2 \cdot \int_0^{t_2} \sigma_2^N(y') dy' \quad (23)$$

Où ΔN_2 représente la résultante des contraintes normales longitudinales pour l'adhérent 2. En substituant l'équation (19) dans l'équation (20), et en développant l'expression des contraintes, nous pouvons écrire :

$$\Delta N_2(x) = E_2 \cdot A_2 \cdot \left\{ \frac{du_2^N(x)}{dx} + \frac{5 \cdot t_2}{12 \cdot G_2} \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} \right\} \quad (24a)$$

$$A_2 = b_2 \cdot t_2 \quad (24b)$$

La déformation longitudinale de la plaque induite par les forces longitudinales $N_2(x)$ peut être exprimée comme suit :

$$\epsilon_2^N(x) = \frac{du_2^N(x)}{dx} = \frac{\Delta N_2(x)}{E_2 \cdot A_2} - \frac{5 \cdot t_2}{12 \cdot G_2} \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (25)$$

L'équation longitudinale de déformation longitudinale de la plaque peut être exprimée comme suit :

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = -\frac{y_2 \cdot M_2(x)}{E_2 \cdot I_2} + \frac{\Delta N_2(x)}{E_2 \cdot A_2} - \frac{5 \cdot t_2}{12 \cdot G_2} \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (26)$$

La force longitudinale résultante $N_1(x)$ pour l'adhérent supérieur est donnée par :

$$N_1(x) = b_1 \cdot \int_0^{t_0} \sigma_1^N(y) dy + b_0 \cdot \int_{t_0}^{t_1-t_0} \sigma_1^N(y) dy + b_1 \cdot \int_{t_1-t_0}^{t_1} \sigma_1^N(y) dy \quad (27)$$

$$N_1(x) = b_1 \cdot \int_0^{t_0} E_1 \cdot \frac{dU_1^N(y)}{dx} \cdot dy + b_0 \cdot \int_{t_0}^{t_1-t_0} E_1 \cdot \frac{dU_1^N(y)}{dx} \cdot dy + b_1 \cdot \int_{t_1-t_0}^{t_1} E_1 \cdot \frac{dU_1^N(y)}{dx} \cdot dy \quad (28)$$

Après développement et arrangement, l'équation (28) peut être écrite comme suit :

$$N_1(x) = E_1 \cdot A_1 \cdot \left\{ \frac{du_1^N}{dx} + \frac{1}{12 \cdot G_1 \cdot t_1^2} \cdot \left[b_1 \cdot \left(\frac{-t_0^4 + 8 \cdot t_1^3 \cdot t_0 - t_1^4 + (t_1 - t_0)^4}{A_1} \right) + b_0 \cdot \left(\frac{4 \cdot t_1^3 \cdot (t_1 - 2 \cdot t_0) - (t_1 - t_0)^4 + t_0^4}{A_1} \right) \right] \frac{d\tau(x)}{dx} \right\} \quad (29)$$

$$A_1 = 2 \cdot b_1 \cdot t_0 + b_0 \cdot (t_1 - 2 \cdot t_0) \quad (30)$$

L'équation (29) conduit à la déformation longitudinale de la poutre induite par la force longitudinale $N_1(x)$.

$$\varepsilon_1^N(x) = \frac{du_1^N(x)}{dx} = \frac{N_1(x)}{E_1 \cdot A_1} - \frac{1}{12 \cdot G_1 \cdot t_1^2} \cdot \left[b_1 \cdot \left(\frac{-t_0^4 + 8 \cdot t_1^3 \cdot t_0 - t_1^4 + (t_1 - t_0)^4}{A_1} \right) + b_0 \cdot \left(\frac{4 \cdot t_1^3 \cdot (t_1 - 2 \cdot t_0) - (t_1 - t_0)^4 + t_0^4}{A_1} \right) \right] \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (31)$$

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{y_1 \cdot M_1(x)}{E_1 \cdot I_1} - \frac{du_1^N(x)}{dx} \quad (32)$$

Les sections transversales de l'adhérent 1 et 2 sont représentées par A_1 et A_2 , respectivement. En substituant l'équation (31) dans l'équation (32), la déformation totale peut être exprimée comme suit :

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{y_1 \cdot M_1(x)}{E_1 \cdot I_1} - \frac{N_1(x)}{E_1 \cdot A_1} + \frac{1}{12 \cdot G_1 \cdot t_1^2} \cdot \left[b_1 \cdot \left(\frac{-t_0^4 + 8 \cdot t_1^3 \cdot t_0 - t_1^4 + (t_1 - t_0)^4}{A_1} \right) + b_0 \cdot \left(\frac{4 \cdot t_1^3 \cdot (t_1 - 2 \cdot t_0) - (t_1 - t_0)^4 + t_0^4}{A_1} \right) \right] \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (33)$$

L'expression de la déformation totale de la poutre peut être réécrite comme suit :

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{y_1 \cdot M_1(x)}{E_1 \cdot I_1} - \frac{N_1(x)}{E_1 \cdot A_1} + \frac{t_1}{4 \cdot G_1} \cdot \xi \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (34)$$

$$\xi = \frac{1}{3 \cdot A_1 \cdot t_1^3} \cdot \left[b_1 \cdot (-t_0^4 + 8 \cdot t_1^3 \cdot t_0 - t_1^4 + (t_1 - t_0)^4) + b_0 \cdot (4 \cdot t_1^3 \cdot (t_1 - 2 \cdot t_0) - (t_1 - t_0)^4 + t_0^4) \right] \quad (35)$$

La contrainte de cisaillement dans la couche d'adhésif peut être exprimée comme suit :

$$\tau(x) = K_s \cdot (u_2(x) - u_1(x)) \quad (36)$$

$$K_s = \frac{G_a}{t_a} \quad (36a) \quad \frac{d\tau(x)}{dx} =$$

$$K_s \cdot \left(\frac{du_2^N(x)}{dx} - \frac{du_1(x)}{dx} \right) \quad (37)$$

En considérant l'équilibre des forces axiales de l'élément infinitésimal, on obtient les expressions suivantes :

$$\frac{dN_i(x)}{dx} = b_2 \cdot \tau(x) , i = 1,2 \quad (38)$$

Après intégration on a :

$$N_i(x) = N(x) = b_2 \cdot \int_0^x \tau(x) \cdot dx, i = 1,2 \quad (39)$$

Ou b_2 est la largeur de la plaque de renforcement.

A partir de l'équilibre vertical de l'élément infinitésimal, les relations suivantes sont obtenues :

$$\frac{dV_i(x)}{dx} = (-1)^i \cdot [q_i + b_2 \cdot \sigma(x)], i = 1, q_i = q; i = 2, q_i = 0 \quad (40)$$

$$\frac{dM_i(x)}{dx} = V_i(x) - b_2 \cdot y_i \cdot \tau(x), i = 1,2 \quad (41)$$

En se référant à l'hypothèse n° 4 on peut écrire l'expression suivante :

$$M_1(x) = R \cdot M_2(x) \quad (42)$$

Ou

$$R = \frac{E_1 \cdot I_1}{E_2 \cdot I_2} \quad (43)$$

L'équilibre des moments de l'élément infinitésimal de la poutre renforcée (figure1) nous permet d'obtenir le moment total $M_T(x)$ comme suit :

$$M_T(x) = M_1(x) + M_2(x) + N(x) \cdot (y_1 + y_2 + t_a) \quad (44)$$

En introduisant les équations 39 et 42 dans l'équation 44, on obtient les relations des moments de flexion de chaque adhérent.

$$M_i(x) = \frac{E_i \cdot I_i}{(EI)_t} \cdot (M_T(x) - b_2 \cdot \int_0^x \tau(x) \cdot (y_1 + y_2 + t_a) dx), i = 1,2 \quad (45)$$

L'expression de l'effort tranchant de chaque adhérent est obtenue en dérivant l'équation précédente :

$$V_i(x) = \frac{dM_i(x)}{dx} = \frac{E_i \cdot I_i}{(EI)_t} \cdot [V_T(x) - b_2 \cdot \tau(x) \cdot (y_1 + y_2 + t_a)], i = 1,2 \quad (46)$$

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = \frac{1}{K_1} \cdot \left\{ -\frac{y_2}{E_2 \cdot I_2} \cdot M_2(x) + \frac{\Delta N_2(x)}{E_2 \cdot A_2} - \frac{y_1}{E_1 \cdot I_1} \cdot M_1(x) + \frac{N_1(x)}{E_1 \cdot A_1} \right\} \quad (47a)$$

$$K_1 = \frac{t_a}{G_a} + \frac{t_1}{4 \cdot G_1} \cdot \xi + \frac{5 \cdot t_2}{12 \cdot G_2} \quad (47b)$$

En dérivant Eq. (47a) suivant x on obtient:

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} = \frac{1}{K_1} \cdot \left\{ -\frac{y_2}{E_2 \cdot I_2} \cdot \frac{dM_2(x)}{dx} + \frac{1}{E_2 \cdot A_2} \cdot \frac{d\Delta N_2(x)}{dx} - \frac{y_1}{E_1 \cdot I_1} \cdot \frac{dM_1(x)}{dx} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \cdot \frac{dN_1(x)}{dx} \right\} \quad (48a)$$

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} = \frac{1}{K_1} \cdot \left[-\frac{y_2}{E_2 \cdot I_2} \cdot \frac{1}{R+1} \cdot \{V_T(x) - b_2 \cdot \tau(x) \cdot (y_1 + y_2 + t_a)\} + \frac{1}{E_2 \cdot A_2} \cdot \frac{d(\Delta N_2(x))}{dx} - \frac{y_1}{E_1 \cdot I_1} \cdot \frac{R}{R+1} \cdot \{V_T(x) - b_2 \cdot \tau(x) \cdot (y_1 + y_2 + t_a)\} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \cdot \frac{dN_1(x)}{dx} \right] \quad (48b)$$

La substitution des équations (45) du moment fléchissant et des équations (39) des forces axiales

dans l'équation (48) permet d'obtenir l'équation différentielle globale de la contrainte de cisaillement.

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} - b_2 \cdot \frac{1}{K_1} \cdot \left[\frac{1}{E_1 \cdot A_1} + \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{(y_1+y_2) \cdot (y_1+y_2+t_a)}{(EI)_t} \right] \cdot \tau(x) + \frac{1}{K_1} \cdot \frac{(y_1+y_2)}{(EI)_t} \cdot V_T(x) = 0 \quad (49)$$

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} - \alpha_1 \cdot \tau(x) + \beta_1 \cdot V_T(x) = 0 \quad (50a)$$

$$\alpha_1 = \frac{b_2}{K_1} \cdot \left[\frac{1}{E_1 \cdot A_1} + \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{(y_1+y_2) \cdot (y_1+y_2+t_a)}{(EI)_t} \right] \quad \beta_1 = \frac{1}{K_1} \cdot \frac{(y_1+y_2)}{(EI)_t} \quad (50b) \quad \lambda^2 = \alpha_1 =$$

$$\frac{b_2}{K_1} \cdot \left[\frac{1}{E_1 \cdot A_1} + \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{(y_1+y_2) \cdot (y_1+y_2+t_a)}{(EI)_t} \right] \quad (50c)$$

$$m_1 = \frac{\beta_1}{\lambda^2} \quad (50d)$$

$$\beta_1 = m_1 \cdot \lambda^2 \quad (50e)$$

III-6 Distribution des contraintes normales:

La contrainte normale est exprimée par l'équation suivante :

$$\sigma(x) = K_n \cdot [w_2(x) - w(x)] \quad (51a)$$

où K_n est la rigidité normale de la couche adhésive.

$$K_n = \frac{E_a}{t_a} \quad (51b)$$

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

En dérivant deux fois l'équation (51a), on obtient :

$$\frac{d^2\sigma(x)}{dx^2} = K_n \cdot \left(\frac{d^2w_2(x)}{dx^2} - \frac{d^2w_1(x)}{dx^2} \right) \quad (52)$$

En se basant sur les relations des courbures moments des poutres et plaques, on a les expressions suivantes :

$$\frac{d^2w_1(x)}{dx^2} = -\frac{1}{E_1 \cdot I_1} M_1(x) \quad (53)$$

$$\frac{d^2w_2(x)}{dx^2} = -\frac{1}{E_2 \cdot I_2} M_2(x) \quad (54)$$

En remplaçant l'expression (41) dans la dérivée première de l'équation (54) par rapport à x , on a:

$$\frac{d^3w_1(x)}{dx^3} = -\frac{1}{E_1 \cdot I_1} \cdot \frac{dM_1(x)}{dx} = -\frac{1}{E_1 \cdot I_1} \cdot [V_1(x) - b_2 \cdot y_1 \cdot \tau(x)] \quad (55)$$

En remplaçant les équations (41) et (42) dans le quatrième dérivée des équations (53) et (54), les équations différentielles de la déformation verticale de l'adhérent 1 $w_1(x)$ et de la déformation verticale de l'adhérent 2 de la poutre $w_2(x)$, sont donnés comme suit:

$$\frac{d^4w_1(x)}{dx^4} = -\frac{1}{E_1 \cdot I_1} \cdot \left[\frac{dV_1(x)}{dx} - b_2 \cdot y_1 \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} \right] = -\frac{1}{E_1 \cdot I_1} \cdot \left[-b_2 \cdot \sigma(x) - q - b_2 \cdot y_1 \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} \right] \quad (56)$$

$$\frac{d^4w_1(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_1 \cdot I_1} \cdot \sigma(x) + \frac{b_2 \cdot y_1}{E_1 \cdot I_1} \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_1 \cdot I_1} \quad (57)$$

$$\frac{d^3w_2(x)}{dx^3} = -\frac{1}{E_2 \cdot I_2} \cdot \frac{dM_2(x)}{dx} = -\frac{1}{E_2 \cdot I_2} \cdot [V_2(x) - b_2 \cdot y_2 \cdot \tau(x)] \quad (58)$$

$$\frac{d^4w_2(x)}{dx^4} = -\frac{b_2}{E_2 \cdot I_2} \cdot \sigma(x) + \frac{b_2 \cdot y_2}{E_2 \cdot I_2} \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (59)$$

$$\frac{d^4\sigma(x)}{dx^4} = \frac{E_a}{t_a} \cdot \left[\frac{d^4w_2(x)}{dx^4} - \frac{d^4w_1(x)}{dx^4} \right] \quad (60)$$

Substitution des équations (57) et (59) dans l'équation (52), nous donne l'équation différentielle de la contrainte normale.

$$\frac{d^4\sigma(x)}{dx^4} = \frac{E_a}{t_a} \cdot \left[-\frac{b_2}{E_2 \cdot I_2} \cdot \sigma(x) + \frac{b_2 \cdot y_2}{E_2 \cdot I_2} \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} - \frac{b_2}{E_1 \cdot I_1} \cdot \sigma(x) - \frac{b_2 \cdot y_1}{E_1 \cdot I_1} \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} - \frac{q}{E_1 \cdot I_1} \right] \quad (61)$$

Après réarrangement de l'équation (61) on a:

$$\frac{d^4\sigma(x)}{dx^4} + \frac{E_a}{t_a} \cdot b_2 \cdot \left(\frac{1}{E_1 \cdot I_1} + \frac{1}{E_2 \cdot I_2} \right) \cdot \sigma(x) + \frac{E_a}{t_a} \cdot b_2 \cdot \left(\frac{y_1}{E_1 \cdot I_1} - \frac{y_2}{E_2 \cdot I_2} \right) \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_1 \cdot I_1} \cdot \frac{E_a}{t_a} \quad (62)$$

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

$$\sigma(x) = e^{-\beta \cdot x} \cdot [C_1 \cdot \cos(\beta \cdot x) + C_2 \cdot \sin(\beta \cdot x) +] + e^{\beta \cdot x} \cdot [C_3 \cdot \cos(\beta \cdot x) + C_4 \cdot \sin(\beta \cdot x) +] - n_1 \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 \cdot q \quad (63)$$

C_3 et C_4 sont des constants d'intégration.

Pour les grandes valeurs de x , on suppose que la contrainte normale tend vers zéro et, par conséquent $C_3=C_4=0$. La solution générale devient donc :

$$\sigma(x) = e^{-\beta \cdot x} \cdot [C_1 \cdot \cos(\beta \cdot x) + C_2 \cdot \sin(\beta \cdot x) +] - n_1 \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 \cdot q \quad (64a)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_a \cdot b_2}{4 \cdot t_a} \cdot \left(\frac{1}{E_1 \cdot I_1} + \frac{1}{E_2 \cdot I_2} \right)} \quad (64b)$$

$$n_1 = \frac{y_1 \cdot E_2 \cdot I_2 - y_2 \cdot E_1 \cdot I_1}{E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2} \quad (64b)$$

$$n_2 = \frac{E_2 \cdot I_2}{b_2 \cdot (E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2)} \quad (64c)$$

Les constantes C_1 et C_2 sont données par les équations(81) et (82) en utilisant les conditions aux limites appropriées.

III-7 Solutions générales pour les contraintes interfaciales :

Contraintes de cisaillement interfaciales:

Pour des raisons de simplicité, les solutions générales présentées ci-dessous sont limitées à des chargements qui sont soit concentrés, soit uniformément répartis sur toute la portée de la poutre. Pour un tel chargement ($\frac{d^2 V_T(x)}{dx^2} = 0$), et la solution générale de l'Eq. (50a) est donné par :

$$\tau(x) = B_1 \cdot \cosh(\lambda \cdot x) + B_2 \cdot \sinh(\lambda \cdot x) + m_1 \cdot V_T(x) \quad (65a)$$

Les constantes d'intégration B_1 et B_2 seront déterminées en fonction du type de chargement.

$$\text{ou } \lambda^2 = \alpha_1 \text{ et } m_1 = \frac{\beta_1}{\lambda^2} \quad (65b)$$

En remplaçant l'expression de l'effort tranchant dans une poutre simplement appuyée soumise à une charge uniformément répartie dans l'équation (65a). La solution générale des contraintes de cisaillement interfaciales pour ce cas de charge peut être exprimée comme suit :

$$\tau(x) = B_1 \cdot \cosh(\lambda \cdot x) + B_2 \cdot \sinh(\lambda \cdot x) + m_1 \cdot q \cdot \left(\frac{L}{2} - a - x \right) \quad 0 \leq x \leq \frac{L_p}{2} \quad (66)$$

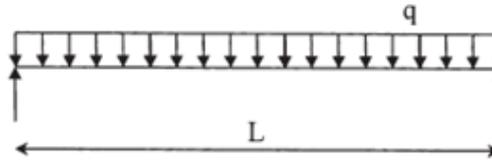


Figure 3.3: Charge uniformément répartie

où q est la charge uniformément répartie et x , a , L et L_p sont définis à la Fig. 1. Les constantes d'intégration doivent être déterminées en appliquant des conditions aux limites appropriées.

Les conditions aux limites des charges réparties sont formulées comme suit :

$$M_2(0) = N_2(0) = N_1(0) = 0, \quad M_1(0) = M_T(0) \text{ et } \frac{dV_T(0)}{dx} = -q \quad (67a)$$

$$\tau(L_p/2) = 0 \quad (67b)$$

La dérivée de l'expression de la contrainte de cisaillement est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = \lambda \cdot B_1 \cdot \sinh(\lambda \cdot x) + \lambda \cdot B_2 \cdot \cosh(\lambda \cdot x) - m_1 \cdot q \quad (68)$$

En appliquant les conditions aux limites définies par l'équation (67a,b) aux équations (66) et (68) on a les expressions des constantes d'intégration B_2 et B_1 :

$$B_2 = \frac{m_1 \cdot q}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{1}{K_1} \cdot \left[\frac{y_1}{E_1 \cdot I_1} \cdot M_T(0) + \frac{N_0}{E_2 \cdot A_2} \right] \quad (69a)$$

$$\text{ou } M_T(0) = \frac{q \cdot a}{2} \cdot (L - a) \quad (69b)$$

$$B_1 = -B_2 \cdot \tanh\left(\frac{\lambda \cdot L_p}{2}\right) \quad (70)$$

Pour des cas pratiques $\frac{\lambda \cdot L_p}{2} > 10$ et $\tanh\left(\frac{\lambda \cdot L_p}{2}\right) \approx 1$ par conséquent, l'expression de B_1 peut être simplifiée en :

$$B_1 = -B_2 \quad (71)$$

En remplaçant B_2 par dans l'équation (71) on a :

$$B_1 = -B_2 = -\frac{m_1 \cdot q}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{1}{K_1} \cdot \left[\frac{y_1}{E_1 \cdot I_1} \cdot M_T(0) + \frac{N_0}{E_2 \cdot A_2} \right] \quad (72)$$

La substitution de B_1 et B_2 dans Eq. (66) donne l'expression de la contrainte interfaciale de cisaillement en tout point.

$$\tau(x) = \left\{ \frac{m_2}{\lambda} \cdot \frac{q \cdot a}{2} \cdot (L - a) + \frac{(m_3 - m_1) \cdot q}{\lambda} \right\} e^{-\lambda \cdot x} + m_1 \cdot q \cdot \left(\frac{L}{2} - a - x \right) \quad 0 \leq x \leq L_p \quad (73)$$

III-8 Contrainte normale d'interface pour la charge répartie :

L'équation (64a) a deux inconnues C_1 et C_2 qui sont être déterminées en utilisant les conditions aux limites adéquates. La première condition aux limites provient du moment de flexion nul à la fin de la Plaque FRP. Substitution de l'équation (67a) dans la dérivée seconde de l'éq. (51a) aboutit à la relation suivante :

$$\frac{d^2 \sigma(0)}{dx^2} = \frac{E_a}{t_a} \cdot \left(\frac{M_1(0)}{E_1 \cdot I_1} - \frac{M_2(0)}{E_2 \cdot I_2} \right) \quad (74)$$

A l'extrémité de la plaque FRP, les conditions aux limites sont décrites comme suit :

$$N_1(0) = N_2(0) = M_2(0) = V_2(0) = 0, V_1(0) = V_T(0) \text{ and } M_1(0) = M_T(0) \quad (75a) \quad V_T(0) =$$

$$q \cdot \left(\frac{L}{2} - a \right) \text{ et } M_T(0) = \frac{q}{2} \cdot a \cdot (L - a) \quad (75b)$$

Donc l'expression ci-dessus peut s'écrire :

$$\frac{d^2 \sigma(0)}{dx^2} = \frac{E_a}{t_a} \cdot \frac{M_T(0)}{E_1 \cdot I_1} \quad (76)$$

La substitution des éqs. (75a) et (75b) dans le troisième dérivée de l'éq. (51a) donne l'expression suivante :

$$\frac{d^3 \sigma(0)}{dx^3} = \frac{E_a}{t_a} \cdot \left(\frac{V_1(0)}{E_1 \cdot I_1} - \frac{V_2(0)}{E_2 \cdot I_2} \right) - \frac{E_a}{t_a} \cdot \left(\frac{y_1}{E_1 \cdot I_1} - \frac{y_2}{E_2 \cdot I_2} \right) \cdot \tau(0) \quad (77)$$

Etant donné que l'effort tranchant est nul à l'extrémité de la plaque FRP $V_2(0) = 0$ alors $V_1(0) = V_T(0)$, et par conséquent, la relation ci-dessus peut s'exprimer comme suit :

$$\frac{d^3 \sigma(0)}{dx^3} = \frac{E_a}{t_a \cdot E_1 \cdot I_1} \cdot V_T(0) - n_3 \cdot \tau(0) \quad (78a)$$

Où

$$n_3 = \frac{E_a}{t_a} \cdot \left(\frac{y_1}{E_1 \cdot I_1} - \frac{y_2}{E_2 \cdot I_2} \right) \quad (78b)$$

Les deuxième et troisième dérivées de la contrainte normale d'interface à la fin de la plaque FRP sont données les relations suivantes :

$$\frac{d^2 \sigma(0)}{dx^2} = -2 \cdot \beta^2 \cdot C_2 - n_1 \cdot \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} - n_2 \cdot \frac{d^2 q}{dx^2} \quad (79)$$

Et

$$\frac{d^3 \sigma(0)}{dx^3} = 2 \cdot \beta^2 \cdot C_1 + 2 \cdot \beta^2 \cdot C_2 - n_1 \cdot \frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} - n_2 \cdot \frac{d^3 q}{dx^3} \quad (80)$$

le chargement, pris en compte dans ce travail, est limité à une charge uniformément répartie q , et donc les dérivées du second ordre et supérieur de q deviennent nulles (c'est-à-dire que $dq/dx^2 = d^3q/dx^3 = 0$). La substitution des équations (77) et (78) dans les équations (79) et (80), respectivement, donne les expressions des coefficients C_1 et C_2 :

$$C_1 = \frac{E_a}{2 \cdot t_a \cdot \beta^3 \cdot E_1 \cdot I_1} \cdot [V_T(0) + \beta \cdot M_T(0)] - \frac{n_3}{2 \cdot \beta^3} \cdot \tau(0) + \frac{n_1}{2 \cdot \beta^3} \cdot \left(\frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \cdot \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \quad (81)$$

$$C_2 = \frac{-E_a}{2 \cdot t_a \cdot \beta^2 \cdot E_1 \cdot I_1} \cdot M_T(0) - \frac{n_1}{2 \cdot \beta^2} \cdot \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad (82)$$

En substituant C_1 et C_2 dans Eq. (64a), la contrainte normale à l'interface peut être évalué en termes de moment de flexion $M_T(0)$ et de l'effort tranchant $V_T(0)$ et est lié à tout cas de charge par son interface contrainte de cisaillement et ses dérivés à l'extrémité de la plaque en FRP (c'est-à-dire $\tau(0), \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3}$, etc.).

III-9 Etude de la flexion des poutres renforcées par des plaques en FRP.

III-9.1 Force axiale le long de la plaque pour la charge répartie :

L'équation de la variation de la charge axiale varie le long de la plaque FRP est obtenue en remplaçant les équations (22), (39) et (45) dans l'équation (47).

$$K_1 \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{(y_1+y_2)}{(EI)_t} \cdot M_T(x) + \frac{N_0}{E_2 \cdot A_2} = N(x) \cdot \left[\frac{1}{E_1 \cdot A_1} + \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{(y_1+y_2) \cdot (y_1+y_2+t_a)}{(EI)_t} \right] \quad (83)$$

$$\frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{1}{K_1} \cdot \frac{(y_1+y_2)}{(EI)_t} \cdot M_T(x) + \frac{1}{K_1} \cdot \frac{N_0}{E_2 \cdot A_2} = N(x) \cdot \frac{\lambda^2}{b_2} \quad (84a)$$

$$\frac{\lambda^2}{b_2} = \frac{1}{E_1 \cdot A_1} + \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{(y_1+y_2) \cdot (y_1+y_2+t_a)}{(EI)_t} \quad (84b)$$

Après réarrangement de l'équation (84a), la relation de la charge axiale $N(x)$ dans la plaque de renforcement est donnée comme suit :

$$N(x) = \frac{b_2}{\lambda^2} \cdot \left[\frac{d\tau(x)}{dx} + m_1 \cdot \lambda^2 \cdot M_T(x) + \frac{1}{K_1} \cdot \frac{N_0}{E_2 \cdot A_2} \right] \quad (85)$$

La charge axiale dans Eq. (85) est exprimée en termes de moment de flexion $M_T(x)$ et est lié à tout cas de charge par la dérivée du premier ordre de la contrainte de cisaillement à l'interface (c'est-à-dire $\frac{d\tau(x)}{dx}$).

III-9.2 Equation différentielle de la déformée verticale ou flèche

Le comportement en flexion de la poutre change à mesure qu'elle est renforcée par la plaque FRP. Éq. (44) peut être exprimé sous la forme suivante :

$$M_1(x) = \frac{E_1 \cdot I_1}{E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2} \cdot (M_T(x) - N(x) \cdot (y_1 + y_2 + t_a)) \quad (86)$$

Substitution de l'équation ci-dessus dans Eq. (53) donne :

$$\frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} = - \frac{1}{E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2} \cdot (M_T(x) - N(x) \cdot (y_1 + y_2 + t_a)) \quad (87)$$

où $N(x)$ est la force axiale, qui peut être remplacée par Eq. (85) comme :

$$\frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} = - \frac{1}{E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2} \cdot \left(M_T(x) - \frac{b_2}{\lambda^2} \cdot \left[\frac{d\tau(x)}{dx} + m_1 \cdot \lambda^2 \cdot M_T(x) + \frac{1}{K_1} \cdot \frac{N_0}{E_2 \cdot A_2} \right] \cdot (y_1 + y_2 + t_a) \right) \quad (88)$$

III-9.3 Solution analytique pour le comportement en flexion

Les poutres plaquées présentent un comportement charge-déformation différent de poutres non renforcées. Cette section dérive une solution pour le comportement en flexion d'une poutre renforcée soumise à la charge répartie q (voir Fig. 3c).

En intégrant l'équation différentielle de second ordre (88) par rapport à x dans la zone renforcée de la poutre, on obtient l'expression de l'équation différentielle du premier ordre de la déformation verticale avec une constante notée D3.

$$\frac{dw_1(x)}{dx} = \int_0^x \left[- \frac{1}{E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2} \cdot \left(M_T(x) - \frac{b_2}{\lambda^2} \cdot \left[\frac{d\tau(x)}{dx} + m_1 \cdot \lambda^2 \cdot M_T(x) + \frac{1}{K_1} \cdot \frac{N_0}{E_2 \cdot A_2} \right] \cdot (y_1 + y_2 + t_a) \right) dx \right] + D3 \quad (89)$$

L'équation de la déformation verticale dans la zone renforcée de la poutre est obtenue en intégrant l'équation différentielle (89).

$$w_1(x) = \int_0^x \left[\int_0^x \left[- \frac{1}{E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2} \cdot \left(M_T(x) - \frac{b_2}{\lambda^2} \cdot \left[\frac{d\tau(x)}{dx} + m_1 \cdot \lambda^2 \cdot M_T(x) + \frac{1}{K_1} \cdot \frac{N_0}{E_2 \cdot A_2} \right] \cdot (y_1 + y_2 + t_a) \right) dx \right] + D3 \right] dx + D4 \quad (90)$$

Où D4 est la constante d'intégration.

L'équation différentielle de la déformée de la partie de la poutre non renforcée est exprimée en utilisant l'hypothèse de Navier – Bernoulli comme suit :

$$\frac{d^2v_1(x)}{dx^2} = \frac{-M_T(x)}{E_1 \cdot I_1} \quad (91)$$

En intégrant deux fois cette équation, on obtient l'expression de la déformation verticale dans la zone

non renforcée de la poutre note $v_1(x)$

$$\frac{dv_1(x)}{dx} = \int_0^x \frac{-M_T(x)}{E_1 \cdot I_1} + D1 \quad (92)$$

$$v_1(x) = \int_0^x \left[\int_0^x \frac{-M_T(x)}{E_1 \cdot I_1} + D1 \right] dx + D2 \quad (93)$$

Où D1 et D2 sont les constantes d'intégration de cette équation. L'expression de la déformation verticale de la poutre renforcée est définie comme suit:

$$w(x) = v_1(x) + w_1(x) \quad (94)$$

Les constantes d'intégration D1, D2, D3 et D4 sont déterminées en vérifiant les conditions aux limites appropriées. Ces conditions sont exprimées par les expressions suivantes :

$$v_1(x = -a) = 0, v_1(x = 0) = w_1(x = 0), \frac{dv_1}{dx}(x = 0) = \frac{dw_1}{dx}(x = 0) \text{ et } \frac{dw_1}{dx}\left(x = \frac{Lp}{2}\right) \quad (95)$$

III-10 Résultats et discussion

Matériaux utilisés

Nous avons appliqué notre analyse à une poutre en béton armé reposant sur deux appuis simples, d'une longueur de trois mètres (3m) (fig 3.1). Cette poutre est soumise à une charge répartie $q=50\text{KN/m}$. La longueur de la plaque de renforcement est $Lp=2.4\text{m}$ et la distance entre l'appui et la plaque est notée a ($a=0.3\text{m}$). Les dimensions de la section de la poutre renforcée sont résumées dans le tableau 3.1.

Dans cette partie, nous présentons les résultats numériques, sous forme de tableau et de courbes, de la méthode exposée dans ce travail. L'influence des paramètres, tels que les propriétés géométriques, mécaniques et l'effort de précontrainte de la plaque, sur les contraintes interfaciales et sur le comportement flexionnelle de la poutre renforcée a été étudiée. Les résultats obtenus par la présente méthode ont été comparés à ceux de la littérature existante.

Les contraintes interfaciales, normales et de cisaillement, élevées aux extrémités de la plaque pourraient provoquer le décollement de celle-ci prématurément. Donc la détermination de manière précise et fiable de ces contraintes peut diminuer le risque de rupture de la poutre renforcée sans réduire l'efficacité de la technique de renforcement. A cet effet nous avons procédé à une comparaison de notre analyse avec d'autres solutions de la littérature (EL Amrani et All, Kerboua et All et Ghaafori et All) pour les poutres renforcées avec des plaques précontraintes et Smith et Teng pour des plaques non précontrainte.

Composants	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Module d'young (MPa)	Coefficient De Poisson	Module de cisaillement transversal (MPa)
RC beam	200	300	30000	0.20	12500
Adhesive layer (RC beam)	200	2.0	2000	0.35	740
CFRP plate (bonded to RC beam)	200	4.0	100000	0.30	38460

Tableau 3.1 :Caractéristique géométrique de la poutre

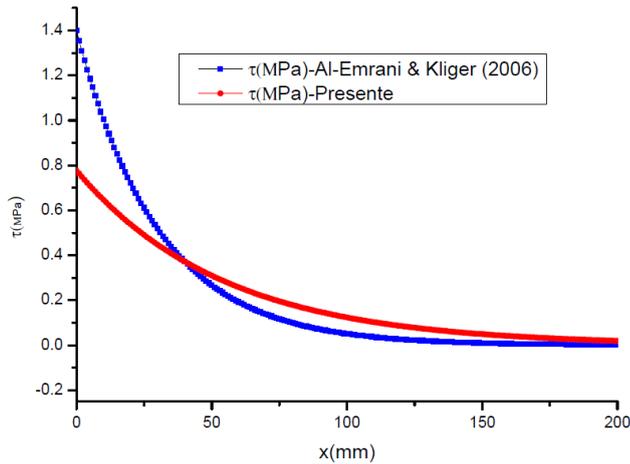


Fig 3-4 : Contraintes de cisaillement interfaciales pour une poutre renforcée avec une plaque collée précontrainte ($N_0=100$ kN), sans charge externe ($q=0$ kN/m).

La figure 3.4 représente la variation des contraintes interfaciales de cisaillement suivant la longueur de la plaque précontrainte (Effort de précontrainte appliqué à la plaque est égal à 100KN.) calculée sur la base de la présente méthode en négligeant les déformations de cisaillement et la méthode de Al Amrani et All. L'étude analytique menée par Al Amrani et All ne soumet pas la poutre renforcée à des charges verticales. Cette figure montre une bonne corrélation entre les résultats de la présente méthode et celle décrite par Al Amrani et All.

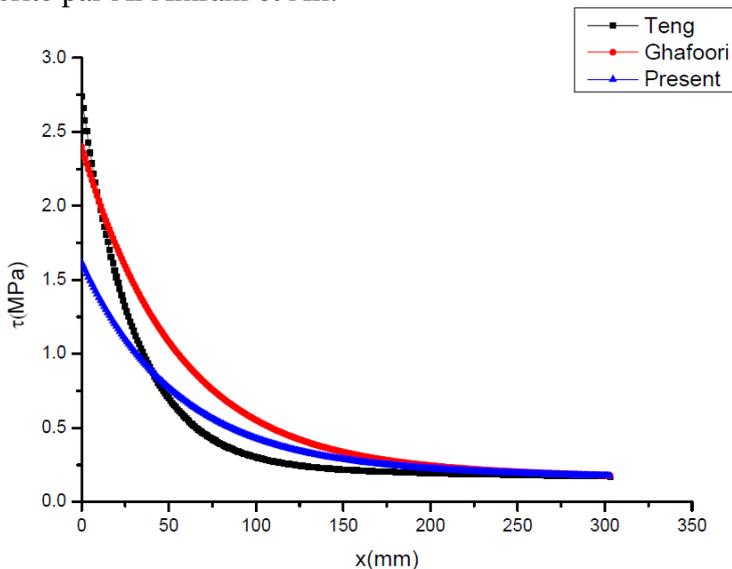


Fig 3-5 : Contraintes de cisaillement interfaciales pour une poutre renforcée avec une plaque collée non précontrainte ($N_0=0$ kN), sans charge externe $q=50$ KN/m.

La figure 3.5 représente les contraintes interfaciales de cisaillement d'une poutre renforcée par une plaque non précontrainte soumise à une charge uniformément répartie $q=50$ KN/m. Les résultats ont été évalués à la fois sur la base de la présente méthode, celle de Ghaafory et de la méthode de Smith et Teng. Les résultats obtenus sont en bon accord entre les trois études analytiques. Cette dernière méthode est établie pour des plaques non précontraintes et ne tient pas compte des déformations de cisaillement (shear-lag). Les deux méthodes introduites dans (17,19) sont axées sur le calcul des contraintes interfaciales normales et de cisaillement dans la couche d'adhésive. L'effet de la précontrainte sur le comportement global en flexion des poutres renforcées sera étudié dans cette analyse.

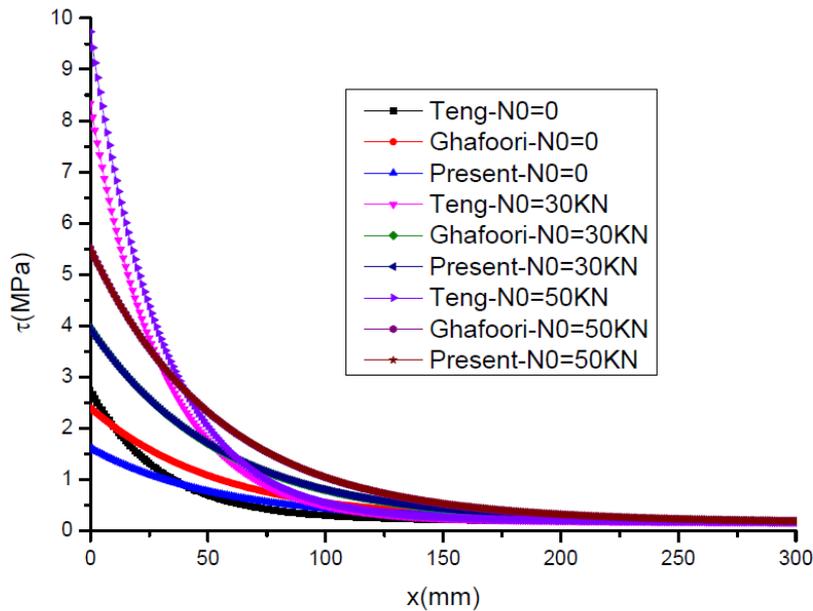


Fig 3-6 : Contraintes de cisaillement interfaciales pour une poutre renforcée avec une plaque collée précontrainte ($N_0=0$, 30kN et 50kN) avec une charge répartie $q=50$ kN/m.

La figure 3.6 montre l'influence, des déformations de cisaillement et l'accroissement de la force de précontrainte de la plaque de renforcement sur les contraintes d'interface de cisaillement dans la couche d'adhésive. La poutre renforcée est soumise à une charge q ($q=50\text{KN/m}$) et la plaque à un effort de précontrainte allant de 0 à 50kN. La prise en compte des déformations de cisaillement diminue de façon substantielle la contrainte maximale située à l'extrémité de la plaque d'un pourcentage qui de l'ordre de 43.5% pour un niveau d'effort de précontrainte de 50kN. Pour des faibles valeurs de la précontrainte l'effet de cisaillement devient moins significatif. A partir cette figure aussi, on peut également en conclure que la valeur de la contrainte maximale de cisaillement se produit à l'extrémité de la plaque et augmente en fur et à mesure que l'effort de la précontrainte croit. Cette contrainte diminue très rapidement et tend vers des valeurs très faibles pour des distances d'environ 150 mm.

Sur la figure 3.7 on constate que les déformations de cisaillement n'affectent pas la répartition des forces axiales suivant la longueur de la plaque. Par contre ces forces augmentent rapidement des le début de plaque ce qui justifie la présence de la forte valeur de la contrainte de cisaillement à l'extrémité de la plaque cela est du au transfert de charge entre la poutre et plaque de renforcement.

La déformation verticale de la poutre renforcée soumise à une charge répartie $q= 50\text{KN/m}$ pour différentes valeur de la force de précontrainte de la plaque ($N_0=0, 30, 50\text{KN}$) est illustrée dans la figure 3.8. L'effet de la déformation de cisaillement est également illustré dans cette figure. La position de l'appui de gauche de la poutre renforcée se trouve à une distance $a=0.3\text{m}$ de l'origine de l'axe des x pris comme extrémité de gauche de la plaque à la force axiale et à la répartition des contraintes de cisaillement interfaciales, le comportement en flexion de la poutre plaquée n'est pas affecté par la déformation de cisaillement. On constate que en fur et à mesure, que le niveau de la précontrainte de la plaque augmente, la déformation verticale de la poutre étudiée diminue. Ce qui démontre l'importance de la prise en compte de cette précontrainte dans la réduction de la flèche donc une croissance de la rigidité de la poutre renforcée.

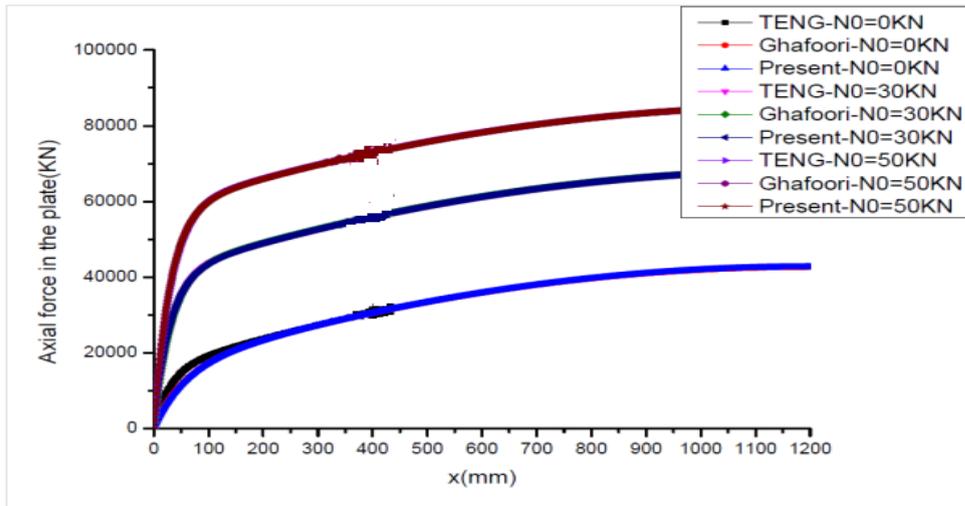


Fig 3-7 : Force axiale en fonction du niveau de la force de précontrainte N_0 et suivant la longueur de la plaque.

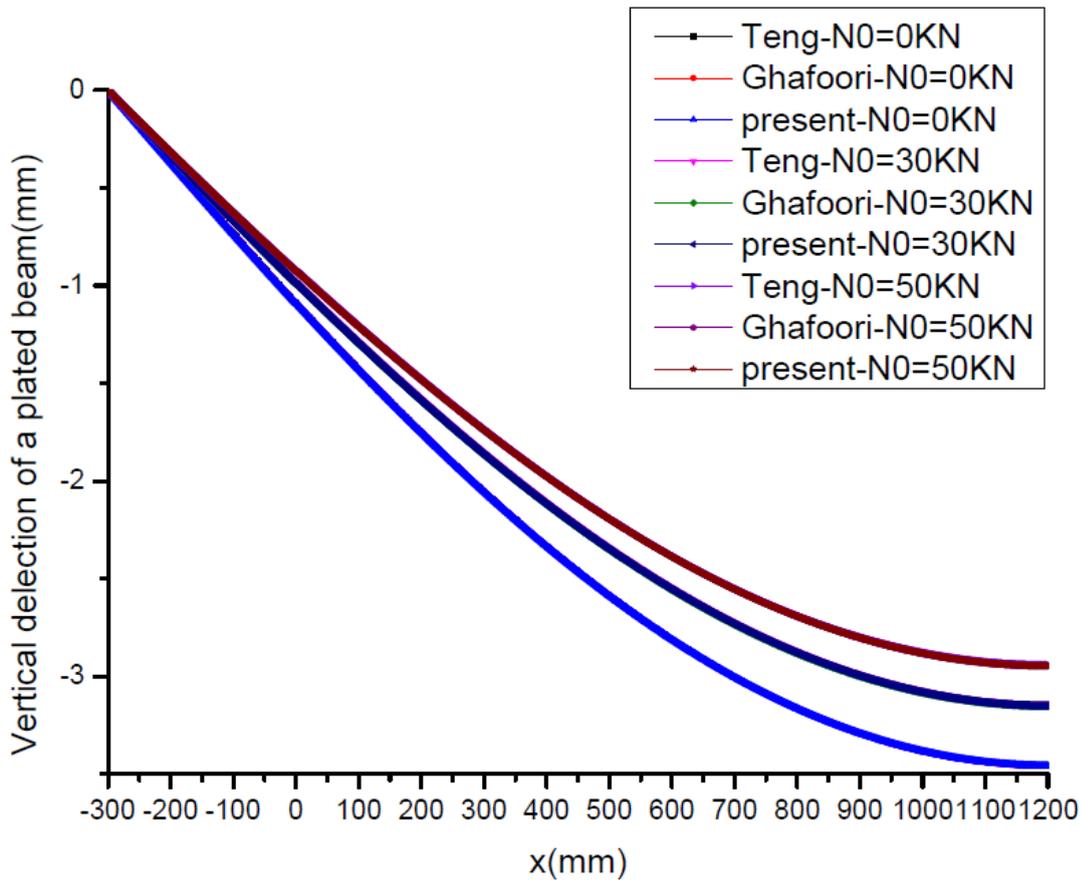
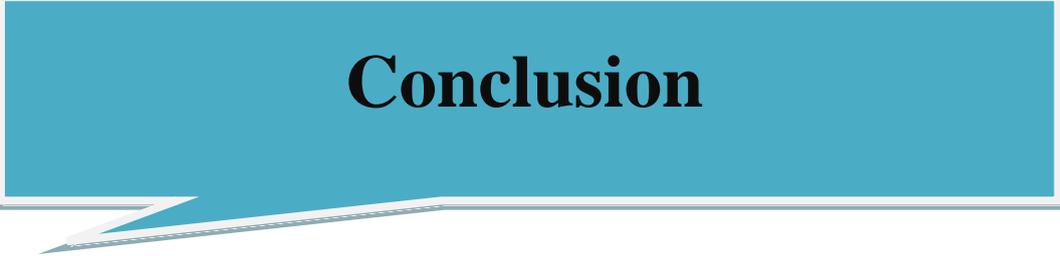


Fig 3-8 : Déformation verticale de la poutre renforcée avec ou sans shear lag en fonction du niveau de la force de précontrainte N_0 de la plaque de renforcement.



Conclusion

III.11 Conclusion:

Dans le présent travail, nous avons étudié le comportement de la poutre renforcée par une plaque précontrainte et une autre non précontrainte en matériau composite FRP. Dans cette étude une attention particulière a été portée au comportement en flexion de cette poutre. Nous avons fait ressortir des expressions explicites des contraintes interfaciales normales et de cisaillement, de la répartition de la charge axiale le long de la plaque précontrainte et de la déformation verticale de la poutre renforcée en utilisant la théorie de déformation de cisaillement élaborée par Tounsi [2006] simultanément dans la poutre et dans la plaque. Nous avons traité le cas où la poutre renforcée est soumise à une charge uniformément répartie. Dans cette analyse on constate que la prise en compte des déformations de cisaillement a une influence prépondérante à la fois dans l'évaluation des contraintes interfaciales et dans le calcul de la répartition des forces axiales, par contre elle a un effet négligeable sur la performance en flexion en fonction de l'accroissement de l'effort de précontrainte dans la plaque.

Références Bibliographiques

- Bachir Kerboua, E. Adda bedia and Abderrahim Benmoussat , Strengthening of damaged structures with bonded prestressed FRP composites plates: an improved theoretical solution
- Adhikary, S.D., Lia, B. and Fujikake, K. (2012), “Dynamic behavior of reinforced concrete beams under varying rates of concentrated loading”. *Internl J. of Imp Engine.*
- Alfa-Carbon,2022,<https://www.amazon.fr/Plaque-carbone-45-300-satin%20C3%A9/dp/B075DHTD85>
- Anders C, Carbon fiber reinforced polymers for strengthening of structural elements, University of technology Lulea Sweden, 2003.
- Ferrier E, Comportement de l’interface composite-béton sous des sollicitations de fluage thermostimulé et en fatigue oligocyclique. Application au calcul previsionnel de la durabilité de poutres BA renforcées, thèse de doctorat, Université Lyon1, 1999.
- Finess, Fiche technique, fibre de verre, 2011.
- Germain M, Renforcement des structures en bois à l’aide de polymère renforcé de fibres (PRF). Université du Québec Montréal, 2021.
- Marc Quiertant, Le renforcement des structures de génie civil par matériaux composites - Principes de fonctionnement, règles de dimensionnement-, Mastère Génie Civil Européen, Module Maintenance, Pathologie et Réparation des Constructions, 2021.
- Nishikant D, Strengthening of reinforced concrete beams using glass fiber reinforced polymer composites, National institute of technology Bourkela India, 2009.
- Québec, La fibre de carbone, L’atelier, (2007).
- Recomman dons.Fr, Fibre de verre: caractéristiques et application, 2022. <https://recommandons.fr/wp-content/uploads/2020/08/333-min-scaled.jpg>
- Sika France SAS, France, 2022.
- Societe freyssinet, renforcement de structures par collage d’un tissu de fibres de carbone, TFC, France ,2009.
- Spadea G, Bencardino F, Swamy R.N.,Structural behavior of composite RC beams with externally bonded CFRP, J. Compos. Constr, 2, pp. 132-137, 1998.
- Taljsten, B, Strengthening of beams by plate bonding, J Mater Civil Eng ASCE, 1997.
- Wikibis, Fibre de verre, 2022. <http://www.editions-humanis.com/nouveau.php>