

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

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

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

MAHOUZ MOHAMED

NOUARI SID AHMED

Sujet du mémoire

***Analyse thermomécanique des contraintes d'interface
d'une poutre console en béton armée endommagée et
réparer par matériaux composites.***

Soutenu publiquement le 13/06/2024 devant le jury composé de :

Mr. AIT AMAR MEZIANE MOHAMED
Mr. RABAHI ABDEREZAK
Mr. HADJ HENNI
Mr. L. HADJI

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur

Remerciements

Avant tout nous remercions Dieu tout puissant qui nous a donné la patience et la force pour mener à terme ce modeste travail.

Le travail présenté dans cette mémoire a été réalisé au sein de Département de génie civil.

Nous remercions le professeur (dr. abderezak rabahi) pour son soutien dans la réalisation de cette recherche et pour les résultats réussis et positifs que nous avons obtenus.

Que les membres de juré soient chaleureusement remerciés d'avoir voulu examiner de près mon travail.

Que l'ensemble des enseignants du département trouve ici mes plus profonds remerciements et ma reconnaissance.

DÉDICACES

La famille et les amis

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste de notations

Résumé

Abstract

ملخص

Introduction générale

Chapitre 01 : Pathologies et technique de réparation des ouvrages en béton armé

I.1.Introduction.....	2
I.2.Pathologies et principales causes des désordres affectant les ouvrages.....	2
I.2.1. Dégradation des matériaux	2
I.2.2. Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution.....	12
I.2.3. Modification des conditions d'exploitation des ouvrages	13
I.3. Méthodes et techniques de renforcement	13
I.3.1.Méthodes de réparation non structurales	13
I.3.2. Méthodes de réparation structurale.....	14
I.3.2.1.Réparation par béton projeté	14
I.3.2.2.Réparation par adjonction d'armature complémentaire	15
I.3.2.3.Réparation par précontrainte additionnelle	15
I.3.2.4.Renforcement par collage de plats métalliques	16
I.4. Réparation et renforcement par collage des matériaux composites.....	17
I.4.1. Utilisation des composites dans le génie civil	17
I.4.2. Remplacement des tôles métalliques par des matériaux composites.....	17
I.4.3. Application des matériaux composites pour la réparation et le renforcement des ouvrages en béton armé	18
I.5.Conclusion.....	21

Chapitre II : Généralité sur les matériaux composites

II.1. Introduction.....	23
II.2. Définition de composite.....	23
II.3. Avantages et inconvénients des matériaux composites.....	23
II.4. Les éléments constituant le matériau composite a base des fibres (les fibres,lesrésines).	24
II.4.1. Les renforts	24
II.4.2. Les matrices.....	28
II.4.2.1. Résines thermodurcissables.....	29
II.4.2.2. Résines thermoplastiques.....	29
II.4.2.3. Comparaison entre ces deux types de résines.....	31
II.5. L'utilisation des composites dans le domaine de génie civil.....	31
II.5.1. Composites dans les bâtiments.....	31
II.5.1.1. Mécanique.....	31
II.5.1.2. Amélioration de la sécurité.....	32
II.5.1.3.Amélioration de certaines propriétés physique.....	32
II.6. Conclusion.....	32

Chapitre III : Comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites

III. 1. Introduction.....	34
III.2. Comportements des poutres en béton armé renforcées par des plaques en matériaux composites sous chargement statique.....	34
III. 2. 1. Comportement mécanique d'une section de poutre renforcée.....	34
III 2. 2. Mécanisme de rupture des poutres renforcées par matériaux composites.....	36
III.2.2.1. Rupture due à la flexion.....	36
III.2.2.2. Rupture due au cisaillement.....	37
III.2.2.3 Rupture due au décollement.....	37

III.2.3. Facteurs ayant une influence sur le comportement des poutres renforcées.....	37
III.2.3.1. Influence du rapport de la distance entre la charge et l'appui par rapport à la hauteur de la section (a_v / h)	38
III.2.3.2. Influence du taux de renforcement des armatures tendues.....	39
III.2.3.3. Influence de la longueur de la plaque composite.....	40
III.2.3.4. Influence de la quantité du composite.....	41
III.3. Conclusion.....	42

Chapitre IV : Analyse thermomécanique des contraintes d'interface d'une poutre console en béton armée endommagée et réparée par matériaux composites.

IV.1. Introduction.....	44
IV.2. Analyse théorique	44
IV.2.1. La distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite – Béto.....	46
IV.2.2. La distribution des contraintes normales dans l'interface composite – .béton.....	49
IV.3. Validation du modèle.....	50
IV.4. L'étude paramétrique	51
IV.4.1. Effet de la températures (DT).....	51
IV.4.2. Effet de la longueur non renforcée (a).....	53
IV.4.3 Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive (ta).....	56
IV.4.4 Effet de la rigidité de la colle d'adhésive E_a	59
IV.4.5 Effet de la largeur ($b_2=b_a$).....	63
IV.5. Conclusion	66
Conclusion Générale	67
Références bibliographique	69

Liste des tableaux

Tableau II.1: Propriétés des fibres de Verre.....	26
Tableau II.2. Propriétés des fibres de carbone	27
Tableau II.3. Propriétés des fibres d'aramides	28
Tableau II.4: Caractéristiques des résines thermodurcissable	29
Tableau II.5 : Comparaison entre les deux types de résines.....	31
Tableau III.1 : Influence de la longueur du renforcement sur la résistance ultime et le mode de rupture (r: taux de renforcement des armatures tendues).....	41
Tableau III.2 : Influence de la quantité de tissu sur la résistance ultime.....	42
Tableau IV.1 : Propriétés géométriques et mécaniques des matériaux.....	50
Tableau IV.1 : L'influence de la température (DT) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée.....	52
Tableau . IV.2 : L'influence de la longueur (a) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée et renforcée par matériaux composites	53
Tableau IV.3: Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive (t_a) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée et renforcée par matériaux composites.....	56
Tableau IV.4: L'influence de la rigidité de la colle d'adhésive (E_a) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée et renforcée par matériaux composites	60
Tableau IV.5: L'influence de la largeur ($b_2=b_a$) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée renforcée par matériaux composites.....	63

Liste des figures

Figure I.1 : Processus général de la carbonatation	2
Figure I.2 : Les différentes étapes de dégradation due à la corrosion.(1) Le béton sain, (2) Pénétration un agent agressif (3) Corrosion de l'armature (4) Eclatement de l'enrobage.....	3
Figure I.3 : Exemples: corrosion des armatures	3
Figure I.4: Poutre située en bord de mer sous de l'agression des chlorures	4
Figure I.5: Exemple de dégradations d'ouvrages dues à l'alcali-réaction	5
Figure I.6: structure en béton armé dégradée par le feu	5
Figure I.7 : Principaux types de retrait du béton	6
Figure I.8 : Dégradation d'un ouvrage soumis au gel dégel	8
Figure .I.9: Fissures en forme d'escalier sur un mur de bâtiment.....	9
Figure .I.10 : Ruptures par cisaillement des piles (Taiwan, 1999)	9
Figure I.11: Effondrement d'un pont lors d'un violent choc de poids lourd.....	10
Figure I.12: Délamination du béton	10
Figure I.13: Renforcement au moyen de béton projeté.....	13
Figure I.14: Projection par voie sèche	13
Figure I.15: Projection par voie humide	13
Figure I.16: Adjonction d'armatures complémentaires	14
Figure I.17: Application de la précontrainte additionnelle pour la réparation des ponts à poutres sous chaussée	15
Figure I.18: Application de plats métalliques selon le procédé L'Hermite	15
Figure I.19: Tôles colées ; (a) difficulté de manutention ; (b) Renforcement du viaduc de Terrenoire par tôles collées perforées -Brevet Freyssinet	15
Figure I.20: renforcement en fibres de carbone.....	17
Figure I.21: Décapage	18
Figure I.22: Brossage de l'élément	18

Figure I.23: Injection de la résine	18
Figure I.24: lissage de la surface de renforcement.....	19
Figure I.25: Découpage de la tissu	19
Figure I.26: Application et accrochage	19
Figure I.27: Enroulement par les fibres	19
Figure I.28: Application de la couche d'accrochage.....	19
Figure II.1 : Matériau composite.....	23
Figure II.2: Les différents types de renfort de bas	24
Figure II.3: Exemple de fibre de verre.....	26
Figure II.4: Exemple de fibre de carbone	27
Figure II.5: Exemple de fibre d'aramide.....	28
Figure II.2: Présente les différentes familles de matrice	29
Figure III.1: Comparaison de comportement entre les poutres renforcées et celles non renforcées (étude présente)	34
Figure III.2 : Les trois phases de comportement d'une poutre en béton armé fléchie renforcée par un stratifié en composite.....	35
Figure III.3 : comportement structural d'une poutre renforcée	35
Figure III.4 : Modes de rupture des poutres renforcées de matériaux composites.....	36
Figure III.5 : Distribution de la déformation d'un tissu	37
Figure III.6 : Définition des paramètres	38
Figure III.7 : Moment ultime des poutres renforcées en fonction de la valeur a_v / h	39
Figure III.8 : Influence du taux de renforcement des armatures	40
Figure IV.1 : Poutre console renforcée par des plaques en matériau composites.....	44
Figure IV.2 : Un segment différentiel de la poutre en béton renforcée par composite.....	45
Figure IV.3: Validation de la présente méthode en comparant avec la méthode de RABAHI(Charge répartie).....	51

Figure IV.4: Validation de la présente méthode en comparant avec la méthode de RABAHI (Charge concentrée).....	51
Figure IV.5: L'influence de la température (DT) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée ($d = 0.15$) et renforcée par matériaux composites : (a) charge répartie, (b) charge concentrée à l'extrémité.....	52
Figure IV.6: L'influence de la longueur a sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée et renforcée par matériaux composites: (a) charge répartie, (b) charge concentrée à l'extrémité.....	55
Figure IV.7 : Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive t_a sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée et renforcée par matériaux composites (a) charge répartie, (b) charge concentrée à l'extrémité.....	59
Figure IV.8: Effet de la rigidité de la colle E_a sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée renforcée par matériaux composites : (a) charge répartie, (b) charge concentrée.....	63
Figure IV.9: L'influence de la largeur (ba) et (b) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée et renforcée par matériaux composites : (a) charge répartie, (b) charge concentrée à l'extrémité.....	65

Liste des notations

B_1 et B_2 : Constantes d'intégration.

b_1 : Largeur de la poutre en béton.

b_2 : Largeur de la plaque de renforcement.

C_1 et C_2 : Constantes d'intégration.

E_c : Module de Young de la poutre en béton.

E_a : Module de Young de l'adhésif.

G_a : Module de cisaillement de la couche d'adhésif.

G_i ($i=c, p$) : Module de cisaillement de l'adhérent "i".

I_c : Moment d'inertie de la section du béton.

K_s : Rigidité tangentielle de l'adhésif.

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

L : Longueur de la poutre.

L_p : Longueur de la plaque de renforcement.

L_0 : Distance entre l'appui et le bord de la plaque.

$M(x)$: Moment fléchissant.

$M_c(x)$ et $M_p(x)$: les moments d'inertie et les moments fléchissant de la poutre en béton et la plaque composite.

$M_T(x)$: Moment total appliqué.

N_i ($i=c, p$) : Force longitudinale pour l'adhérent "i".

$N_c(x)$ et $N_p(x)$: les forces axiales du béton et de la plaque composite respectivement.

$\{N\}$: Vecteur des efforts normaux.

q : Charge répartie.

t_i ($i=c, p$) : Epaisseur de l'adhérent "i".

t_a : Epaisseur de l'adhésif.

$U_N(x, y)$: Déplacement longitudinal dans la poutre renforcée induit par force longitudinale.

u_c : Déplacement longitudinal à la base de la poutre en béton.

u_p : Déplacement longitudinal à la partie supérieur de la plaque.

$V(x)$: Effort tranchant.

$V_c(x)$: Effort tranchant appliqué dans la poutre en béton.

$V_p(x)$: Effort tranchant appliqué dans la plaque de renforcement.

C_1, C_2 : constantes d'intégration déterminées par les conditions aux limites.

w_i ($i=c, p$) : Déplacement vertical de l'adhérent "i".

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

ε_c : Déformation à la base de l'adhérent 1.

E_p : Déformation à la partie supérieure de l'adhérent 2.

$\tau(x)$ Contrainte de cisaillement.

$\sigma_n(x)$ Contrainte normale.

Résumé

L'emploi des matériaux composites dans la réparation et la réhabilitation des structures en béton armé, sujettes à des dégradations et à des contraintes environnementales sévères, s'avère être une solution prometteuse et efficace. Cette méthode implique l'application d'une plaque composite sur ces structures afin d'en améliorer la rigidité et la résistance face à la flexion et/ou à l'effort tranchant. Toutefois, le principal mode de défaillance de ces structures renforcées est le décollement de la plaque composite, attribuable aux contraintes d'interface élevées près du bord de la plaque. Ainsi, pour éviter tout risque potentiel compromettant la stabilité globale de la structure, il est essentiel de prendre en compte ces contraintes.

Dans ce travail, nous examinons le comportement d'une poutre console en béton armé endommagée sous chargement mécanique et sous l'influence de la température, renforcée par des matériaux composites. Une approche analytique basée sur le principe de compatibilité des déformations est utilisée pour calculer les contraintes à l'interface composite - béton armé à l'extrémité de la plaque de renforcement, en tenant compte des déformations de cisaillement dans les deux adhérents. Les résultats de notre modèle sont validés par comparaison avec les données de littérature sur les contraintes d'interface. Une étude paramétrique est également menée pour mettre en lumière l'impact de différents paramètres sur les contraintes d'interface.

Mots clés : poutre en béton armé, renforcement, réparation, matériau composite, plaque composite, contrainte d'interface

Abstract

The use of composite materials in the repair and rehabilitation of reinforced concrete structures, subject to degradation and severe environmental constraints, proves to be a promising and effective solution. This method involves applying a composite plate to these structures to improve their rigidity and resistance to bending and/or shear forces. However, the primary mode of failure for these reinforced structures is the delamination of the composite plate, attributable to high interface stresses near the plate edge. Therefore, to avoid any potential risks compromising the overall stability of the structure, it is essential to consider these constraints.

In this work, we examine the behavior of a damaged reinforced concrete console beam under mechanical loading, Under the temperatures' influence.reinforced with composite materials. An analytical approach based on the principle of compatibility of deformations is used to calculate the stresses at the composite-concrete interface at the end of the reinforcement plate, taking into account shear deformations in both adherents. The results of our model are validated by comparison with literature data on interface stresses. A parametric study is also conducted to highlight the impact of different parameters on interface stresses.

Keywords: reinforced concrete beam, reinforcement, repair, composite material, composite plate, interface stress

ملخص

استخدام المواد المركبة في إصلاح وتجديد الهياكل المصنوعة من الخرسانة المسلحة، التي تتعرض للتلف والضغوط البيئية الشديدة، يثبت أنها حلاً واعداً وفعالاً. يتضمن هذا الأسلوب تطبيق لوح مركب على هذه الهياكل لتعزيز صلابتها ومقاومتها للانحناء و/أو القص. ومع ذلك، يُعتبر فصل اللوح المركب هو الوضعية الرئيسية لفشل هذه الهياكل المعززة، نظراً للتوترات السطحية العالية بالقرب من حافة اللوح. لذلك، من الضروري أخذ هذه القيود في الاعتبار لتجنب أي مخاطر قد تهدد الاستقرار العام للهيكل.

في هذا العمل، ندرس سلوك شريط كونسول من الخرسانة المسلحة تحت تأثير الحمل الميكانيكي والحراري، مع تعزيزه بالمواد المركبة. يتم استخدام نهج تحليلي يستند إلى مبدأ توافق التشوهات لحساب التوترات عند واجهة اللوح المركب - الخرسانة المسلحة عند نهاية لوحة التعزيز، مع مراعاة التشوهات الانقطاعية في كلا الملتصقين. تم التحقق من نتائج نموذجنا عن طريق المقارنة مع بيانات الأدبيات حول التوترات عند الواجهة. كما تم إجراء دراسة تعليمية لتسليط الضوء على تأثير مختلف المتغيرات على التوترات عند الواجهة.

الكلمات الرئيسية: شريط خرساني مسلح، تعزيز، إصلاح، مادة مركبة، لوحة مركبة، توتر واجهة

Introduction générale

La durée de vie des structures artistiques représente un défi économique majeur pour les concepteurs. Cela se réalise par la maîtrise du design qui prend en compte tous les facteurs pouvant entraîner des problèmes de détérioration ou d'instabilité de l'infrastructure. Cependant, en raison des perturbations continues touchant de nombreuses installations, le renforcement et la réhabilitation sont des aspects extrêmement importants pour assurer la résilience et prolonger la durée de vie de l'infrastructure.

Pour répondre à ces besoins, il est essentiel de comprendre les causes sous-jacentes et les mécanismes de détérioration divers qui conduisent au déclin d'une infrastructure, afin d'évaluer l'état actuel de celle-ci et d'entreprendre les travaux de renforcement appropriés.

Dans le passé, la seule solution pour les installations défectueuses était de les démolir et de les reconstruire entièrement. Cependant, au cours des dernières décennies, les travaux de renforcement et de réhabilitation ont connu un développement significatif en termes de méthodes et de matériaux utilisés.

L'amélioration des propriétés des matériaux des installations existantes, ainsi que le développement continu de nouveaux types de matériaux, jouent un rôle crucial dans les opérations de renforcement et de réhabilitation, car le matériau est l'élément essentiel de toute structure.

Les matériaux composites présentent des avantages importants par rapport aux matériaux traditionnels, offrant de nombreux bénéfices tels que la résistance mécanique et chimique, la faible maintenance et la liberté de forme. Ils contribuent à prolonger la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Cependant, le principal inconvénient des matériaux composites est la formation d'accumulations de contraintes au niveau des interfaces entre les couches, résultant des changements soudains dans les propriétés mécaniques d'une couche à l'autre.

L'objectif de notre travail est le développement d'une solution analytique directe qui Détermine les contraintes d'interface au niveau de la couche d'adhésif d'une poutre console en béton armé endommagée et réparer par matériaux composites

Ce travail est composé de quatre chapitres qui se résumant comme suite :

Le premier chapitre : décrira, à travers une étude bibliographique les pathologies des structures en béton armée. Puisque l'élément étudié dans notre travail est une poutre en béton armée et Défini les différentes technologies de réparation et de renforcement couramment utilisées dont la technique de renforcement par matériaux composites.

Le deuxième chapitre : Sera consacré à une revue d'ensemble sur les matériaux composites et leurs différentes propriétés.

Au troisième chapitre une recherche bibliographique sur le comportement des poutres renforcées en plaques de matériaux composites et les différentes solutions proposées dans la littérature pour déterminer les contraintes d'interface.

Le quatrième chapitre : sera consacré sur les résultats obtenus et les études Paramétriques qui influent sur le comportement d'une poutre console en béton armé renforcée par différents types des composites.

Enfin nous achevons notre travail par une conclusion générale construite avec les résultats obtenus avec notre méthode et permet de souligner son efficacité dans la conception et le calcul relatif au renforcement des structures par matériaux composites, et nous dégagerons quelques perspectives au travail présenté ici.

CHAPITRE 01

Pathologies et technique de réparation des ouvrages en béton armé

I.1. Introduction

La durabilité d'une construction dépend de divers facteurs, notamment la qualité de sa conception, des matériaux utilisés, de son exécution, ainsi que des conditions d'utilisation, d'exploitation et de maintenance. Depuis plus d'un siècle, le béton armé est le matériau de prédilection dans le domaine du génie civil, mais il peut subir des dégradations et perdre certaines de ses propriétés en raison de diverses causes.

Étant donné le coût élevé des structures de génie civil, il est crucial de pouvoir les réparer pour prolonger leur durée de vie. Le choix de la méthode de réparation et des matériaux à utiliser dépend de la nature et de la gravité des problèmes observés, ainsi que des considérations économiques, des conditions de chantier et des contraintes du site.

Il existe de nombreuses solutions techniques bien maîtrisées, ayant fait leurs preuves en termes d'efficacité pour résoudre les divers problèmes pouvant affecter les matériaux ou les structures. Il est essentiel de sélectionner la solution technique appropriée en fonction du diagnostic complet et précis des problèmes, de leurs causes et de leur évolution.

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

I.2.1. Dégradation des matériaux

➤ Carbonatation du béton

La carbonatation est un processus naturel de vieillissement qui affecte tous les types de béton. Il résulte de la réaction entre les composés du ciment, notamment la portlandite $(OH)_2$, et le dioxyde de carbone atmosphérique (CO_2), présent dans l'air à environ 0,03 % en volume. Ce processus entraîne une diminution du pH du béton, passant de 13 à moins de 9, ce qui rend les armatures en acier vulnérables. [1].

Le phénomène de carbonatation est la succession de 3 étapes de réaction [2]

1. La dissolution du dioxyde de carbone (CO_2) dans la solution interstitielle du béton entraîne la formation d'ions CO_3^- , ce qui a pour effet de diminuer le pH de la solution..
 2. La portlandite ($Ca(OH)_2$) se dissout pour libérer des ions OH^- , qui agissent pour neutraliser la baisse de pH.
 3. La formation de calcite à partir des ions Ca^{+} issus de la dissolution de la portlandite.
- Cette succession d'étapes est résumée par la réaction suivante :



La carbonatation ne se produit ni dans un béton totalement sec ni dans un béton totalement saturé en eau. La vitesse à laquelle elle se produit est maximale pour les bétons conventionnels lorsque l'humidité relative se situe entre 40 % et 65 %.

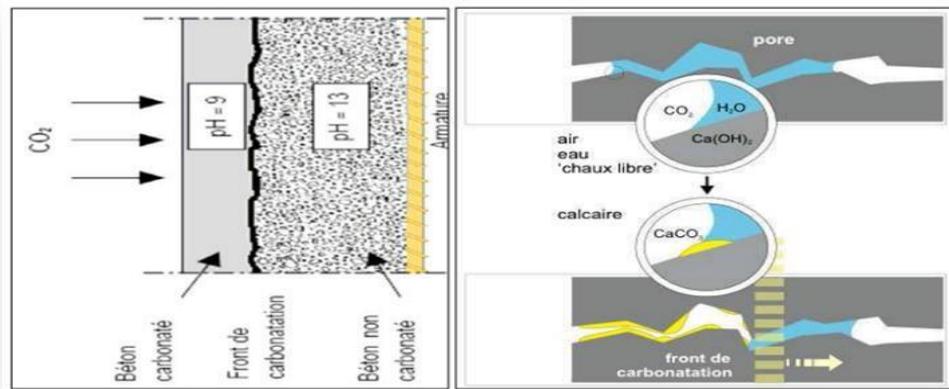


Figure I.1 : Processus général de la carbonatation [2]

Les répercussions de cette réaction chimique sont considérables pour les armatures, car elles se retrouvent dans un environnement où elles ne sont plus protégées et peuvent ainsi se corroder. Cela entraîne une prolifération de la rouille, ce qui endommage la surface du béton et déplace simultanément le front de carbonatation.

➤ **Corrosion des armatures :**

La corrosion des armatures en acier dans le béton est le résultat d'un processus chimique. Elle se produit lorsque la protection offerte par le béton cesse d'être efficace. Ceci se produit dans les deux cas suivants :

Quand le béton enveloppant l'armature est carbonaté, la dissolution du fer entraîne la formation de produits de corrosion (rouille) qui occupent un volume bien plus important que celui du fer initial. Cela provoque une expansion et une fissuration du béton. Le retrait physique de la couche protectrice de béton entraîne une accélération de la corrosion de l'armature. [3].

- Lorsque des ions agressifs (comme des chlorures) ont traversé l'épaisseur du béton d'enrobage et entrent en contact avec l'armature.

- L'acier ne peut se corroder que s'il est mis simultanément en présence d'eau et d'oxygène [3].

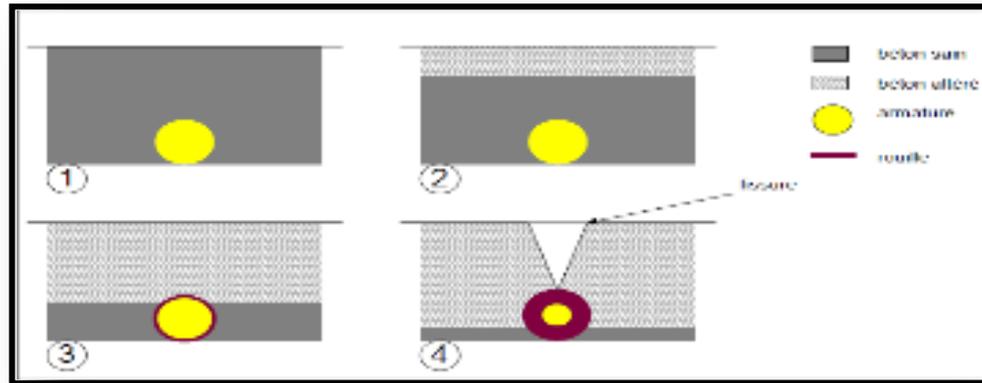


Figure 1.2 : Les différentes étapes de dégradation due à la corrosion.

(1) Le béton sain, (2) Pénétration un agent agressif (3) Corrosion de l'armature (4) Eclatement de l'enrobage [4]

Les ouvrages et les éléments concernés par la corrosion des armatures sont les suivants :

- **Bâtiments:** Les acrotères, balcons, éléments verticaux et terrasses, surtout dans les environnements industriels et maritimes, sont les parties les plus vulnérables des bâtiments. Cela est dû soit à leur faible épaisseur, soit à la difficulté à maintenir des revêtements de protection adéquats. [4]

- **Ponts et ouvrages d'art:** dans cette catégorie d'ouvrages, il apparaît que les zones les plus

sensibles soient les tabliers, poutres [4]



Figure 1.3 : Exemples: corrosion des armatures [5] [6]

Les conséquences de la corrosion [4] sur la structure sont:

- ✓ - Réduction de la section de l'armature due à la corrosion.
- ✓ - Apparition de fissurations et de fractures dans le béton.
- ✓ - Décollement du béton d'enrobage entourant les armatures.

- ✓ - Diminution de l'adhérence entre l'acier et le béton.
- ✓ - Préoccupation pour la sécurité des usagers de la structure.
- ✓ - Stabilité de la construction ; en cas de corrosion uniforme et généralisée, la ductilité des poutres (exprimée en termes de flèche) est moins affectée. [4] et la perte d'adhérence joue probablement un rôle important dans ce phénomène

➤ Réactions sulfatiques

Les réactions sulfatiques sont déclenchées par l'interaction des sulfates provenant de sources extérieures telles que les eaux souterraines, les remblais contenant des sulfates, les pluies acides et les eaux usées, avec la chaux et les aluminates présents dans le ciment. Le produit final de cette réaction est l'étrangéité, qui, lorsqu'elle se développe à l'intérieur du béton, entraîne une expansion pouvant altérer ses propriétés mécaniques. [7].



Figure I.4: Poutre située en bord de mer sous de l'agression des chlorures [8].

➤ Alkali-réaction

La réaction alcali-silice est une interaction chimique entre la silice présente dans les granulats et les alcalins contenus dans la pâte de ciment. Cette réaction ne concerne que les granulats renfermant des silices réactives ou amorphes. Elle se produit à la périphérie des granulats et entraîne des gonflements préjudiciables à la résistance des bétons, se manifestant sous forme de fissures et parfois d'éclatements. Bien que la réaction alcali-silice soit la plus courante, il existe également des réactions alcali-carbonate et alcali-silicate. [9][10]

Lorsque les conditions sont réunies en ce qui concerne les alcalins et les silices réactives, cette réaction a tendance à se développer principalement dans les structures soumises à une humidité permanente, telles que la plupart des ouvrages hydrauliques. Dans ce cas, elle affecte généralement la structure dans son ensemble.



Figure I.5: Exemple de dégradations d'ouvrages dues à l'alcali-réaction [11]

I.2.1.2. Pathologies d'origine physique

➤ Incendie:

Les dégradations du béton dues à un incendie entraînent des dommages significatifs tant au niveau du béton que des armatures. L'incendie provoque une augmentation rapide de la température du béton, atteignant plus de 700°C en 4 heures à une certaine distance du parement. Cela entraîne d'une part d'importantes contraintes différentielles entre le parement et le cœur du béton, et d'autre part une transformation irréversible des composants du béton.

La température à un point situé dans le noyau d'une poutre, à 5 cm du parement, atteint environ 150°C après 30 minutes, 600°C après 2 heures et 850°C après 4 heures. À une température de 573°C, les granulats contenant du quartz se fissurent, tandis qu'à 800°C, les granulats calcaires se décarbonatent, libérant du CaCO₃. [12].



Figure I.6: structure en béton armé dégradée par le feu [13]

➤ Retrait

Le retrait du béton est un phénomène physico-chimique qui se produit à différentes étapes, de la prise du béton à son vieillissement. Il résulte de la libération de l'eau excédentaire du béton vers l'extérieur et/ou de la chaleur dégagée lors de la réaction chimique d'hydratation

(réaction exothermique). Le signe distinctif de l'effet du retrait sur une structure est l'apparition de fissures, qui peuvent être orientées dans une direction spécifique ou multidirectionnelles. [7].

Les différents types de fissures de retrait peuvent être classés, suivant leur ordre chronologique d'apparition, en trois types de l'élément de structure [14]

- **Fissures apparaissant une ou deux heures après le bétonnage:** Les fissures sont induites par le retrait du béton frais. Elles sont généralement profondes et ouvertes, affectant les surfaces horizontales et créant un gradient vertical dans l'ensemble des propriétés physiques et mécaniques. [14]
- **Fissures apparaissant juste après le décoffrage :** Ces fissures affectent à la fois les surfaces horizontales et les parements verticaux. Elles sont généralement fines et peu profondes, mais peuvent être plus larges lorsque le retrait thermique est en jeu. En effet, le retrait thermique est directement lié à l'augmentation de la température du béton. [15].
- **Fissures apparaissant plusieurs jours ou plusieurs mois après le décoffrage :** Les fissures résultent du retrait à long terme, qui se produit lorsque l'eau s'évapore pour établir un équilibre hygrométrique entre la structure en béton et son environnement extérieur. [14].

Quatre types de retrait (thermique, plastique, endogène et dessiccation) [15] peuvent être à l'origine de l'apparition de fissure sur la surface des ouvrages en béton armé.

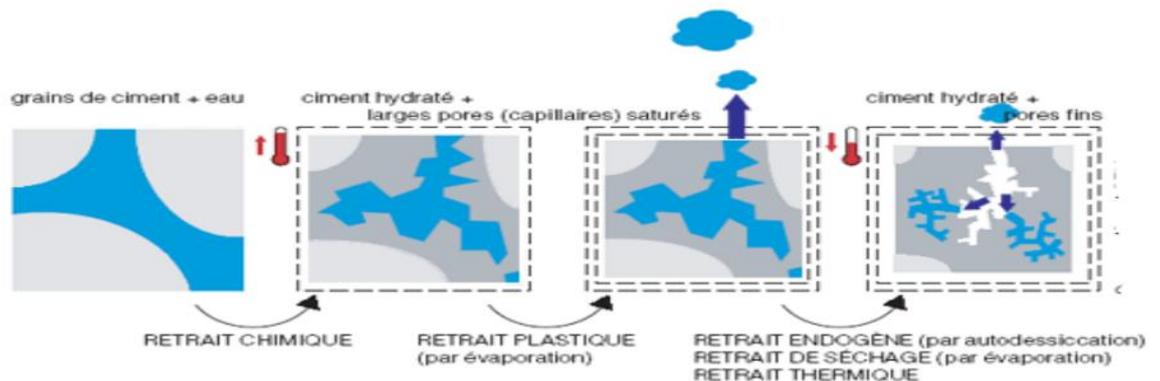


Figure I.7 : Principaux types de retrait du béton [16]

a) Retrait de dessiccation

Le retrait de dessiccation est associé au processus de séchage qui survient avant, pendant et après la prise du béton.

Il résulte d'un déséquilibre hygrométrique entre le matériau et son environnement extérieur. [15] Les fissures qui en résultent sont causées par la dépression capillaire, qui se produit lorsque des ménisques d'eau se forment dans les pores capillaires du béton frais.

Ce retrait, qui résulte de l'évaporation de l'eau, peut commencer quelques minutes après la mise en œuvre du béton et se poursuivre pendant plusieurs semaines. Il est généralement de l'ordre de 1 millimètre par mètre.

b) Retrait Endogène

On l'appelle parfois retrait d'autodessiccation et quelquefois aussi retrait chimique [17], Le retrait endogène est associé à la contraction du béton pendant son processus d'hydratation, tout en étant protégé contre tout échange d'eau avec l'environnement extérieur. Ce phénomène résulte de l'auto-dessiccation de la pâte de ciment après la contraction. La contraction est provoquée par des forces de traction capillaires internes, similaires à celles responsables du retrait plastique. Ce type de retrait est plus prononcé dans les bétons à hautes performances (BHP) ou à très hautes performances (BTHP), tandis qu'il devient négligeable pour les bétons ordinaires. [18].

c) Retrait plastique

Avant la prise, une partie d'eau du béton frais peut s'évaporer ou être absorbée par le support. Ce processus crée des tensions capillaires dans le matériau, entraînant une contraction du volume occupé par la pâte, ce qui est appelé retrait plastique. L'impact du retrait plastique sur le comportement mécanique des structures réparées par des rechargements minces adhérents n'est pas significatif, car ces rechargements peuvent s'ajuster aux variations dimensionnelles avant que le matériau ne prenne complètement. [19]

d) Retrait thermique

Le retrait thermique peut entraîner des fissures préexistantes dans le béton. Lors de la prise et du durcissement du béton, de la chaleur est dégagée, puis le matériau se contracte pendant son refroidissement. Ce phénomène est amplifié par les effets de masse, où la température d'hydratation peut varier selon la masse de la pièce, étant généralement plus élevée au centre des structures massives et plus basse près des parois en raison des échanges thermiques avec l'extérieur..

L'expérience démontre que le retrait contraint, qu'il soit dû à des facteurs hydrauliques et/ou thermiques, peut entraîner des fissures dans tous les éléments de construction, mais principalement dans les murs et les dalles, en fonction de leur longueur, leur épaisseur, leur

armature, l'humidité ambiante et les conditions climatiques telles que l'exposition au soleil, au vent et à la pluie. Le retrait hydraulique se produit lorsque l'eau de gâchage s'évapore. [19]

➤ **Cycle Gel-dégel**

Dans les régions à climat froid, les ouvrages en béton sont soumis aux effets du gel et du dégel. L'eau présente dans les pores du béton gèle à des températures inférieures à zéro degré Celsius (-3 °C à -4 °C). Lorsque l'eau passe de l'état liquide à l'état solide, elle exerce des pressions hydrauliques sur les capillaires restés liquides, ce qui entraîne une augmentation du volume du béton d'environ 9 %. Si ces pressions hydrauliques dépassent la résistance à la traction du béton, cela peut provoquer sa fissuration. [16]



Figure I.8 : Dégradation d'un ouvrage soumis au gel dégel [20]

I.4. Pathologies d'origine mécanique

➤ ***Tassement différentiel***

Le tassement différentiel se produit lorsque le sol se tasse de manière inégale sous différents points d'une fondation. Cela peut se manifester par un basculement ou par des dommages graves aux éléments non structuraux, voire à la structure elle-même en cas de tassement important..

Les causes des tassements différentiels sont multiples, mais les plus fréquemment rencontrés sont :

- Les sols compressibles,
- Les remblais récents,
- La non homogénéité du sous-sol de fondations,
- L'emploi des fondations hétérogènes,
- Les affouillements du sol sous les fondations,

- La modification du volume de certains sols en fonction de la teneur en eau,
- La non homogénéité de la super structure .[21]

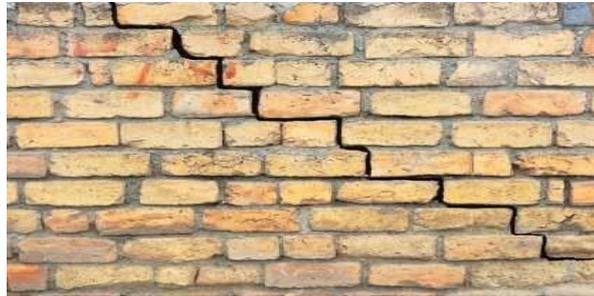


Figure .I.9: Fissures en forme d'escalier sur un mur de bâtiment[22]

➤ Séisme

Même en cas de séisme léger, des dommages importants peuvent survenir. Les fondations sont particulièrement vulnérables en raison des vibrations qui modifient la consistance du sol de support. Les liaisons entre les piles et les poutres peuvent être affectées par des forces de cisaillement dues à la secousse, tout comme les fixations, les ancrages et les assemblages, qui peuvent subir des soulèvements, des torsions ou des arrachements des pièces qu'ils maintiennent. Bien que cela ne conduise pas nécessairement à l'effondrement de la structure, de tels événements peuvent causer des dommages sérieux aux éléments porteurs de l'ouvrage, compromettant ainsi sa stabilité. [23]



Figure .I.10 : Ruptures par cisaillement des piles (Taiwan, 1999) [22]

➤ Les chocs

Les infrastructures les plus vulnérables à l'érosion se trouvent principalement dans les environnements fluviaux et maritimes. Elles sont exposées au transport de matériaux solides

causé par les courants et à l'action des vagues à chaque marée. La détérioration du béton par frottement se manifeste par l'apparition de défauts géométriques en surface, de zones érodées et d'éclats superficiels, ce qui expose les armatures et accélère le risque de corrosion. [1]



Figure I.11: Effondrement d'un pont lors d'un violent choc de poids lourd[22]

➤ **Délamination**

L'interaction entre les conditions climatiques, l'utilisation de sels anti-verglas et le trafic direct sur les hourdis de ponts entraîne des délaminations du béton sur de nombreux ouvrages d'art aux États-Unis et au Canada. En France, la principale cause de délaminations du béton est la dissolution de la chaux présente dans le béton, suivie éventuellement du gel de ce béton saturé d'eau. L'action répétée des roues des poids lourds conduit à un écaillage localisé des hourdis, entraînant la formation de cavités dans le béton.[24]



Figure I.12: Délamination du béton [13]

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

Ces types de problèmes peuvent survenir en raison d'erreurs commises soit lors de la conception de l'ouvrage, soit lors de sa construction. Parmi les conditions souvent mal évaluées, on peut citer l'impact des variations de température sur la structure, une estimation incorrecte des forces de précontrainte, ainsi que des données imprécises sur la relaxation des câbles et leur interaction avec la structure. Un mauvais calcul des dimensions et de l'espacement des cadres pour supporter les forces de cisaillement dans le béton armé peut entraîner des fissurations nécessitant une réhabilitation immédiate de l'ouvrage.[25]

Des études statistiques menées par le bureau Sécurité de la SOCOTEC en France sur 2979 dossiers de structures en béton ont révélé que le nombre total de sinistres attribuables à des erreurs de conception ou d'exécution se répartissait comme suit : [26]

Erreurs de conception :

- Erreurs dans le bon choix du matériau constituant l'ouvrage.
- Erreurs dans le pré dimensionnement des éléments.
- Négligence totale de la sismicité de la zone.
- Mauvais choix de la meilleure variante.
- Absence de l'étude comparative technico-économique.
- Structure instable.
- Un tassement.
- Un manque d'armatures.
- Une surcharge dont la structure ne peut pas résister.
- Un manque de joints.

Erreurs de calcul (étude) :

- Erreurs dans les hypothèses de calcul.
- Erreurs dans l'introduction des données dans un calcul automatique.
- Absence d'études.
- Mauvaise utilisation des règlements.
- Non vérification des états de service (déformations).
- Dessins incomplet ou insuffisant.

Erreurs d'exécution et de réalisation :

- Dispositions défectueuses (notamment dispositions d'armatures) dans certains éléments ou dans la transmission des efforts (environ 2.5%).
- Désordres résultants de déformations excessives (soit 19.7%)

- Fautes d'exécution, surtout la confection des éléments en béton armé (15.5%) : Coffrage 2%, Bétonnage 4%, Ferrailage 7%, Décoffrage 0.5%, Causes multiples (généralement bétonnage et ferrailage défectueux) 1.5%.
- Fausses mains d'œuvre 1.5%.
- Désordres résultant des effets des variations dimensionnelles 43.7%.
- Mauvaise qualité du béton (une porosité très élevée) ce qui facilite la circulation des agents agressifs et l'eau.
- La ségrégation du béton due à la condition de transport du béton frais.

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

Dans le contexte des ouvrages d'art, les conditions d'exploitation évoluent souvent en raison de changements dans les charges réglementaires ou dans la fréquence de passage des véhicules. Par exemple, la mise en conformité des bâtiments et des ponts aux sollicitations sismiques est une problématique actuelle majeure. Les récents séismes ont mis en évidence un risque sismique significatif pour le patrimoine bâti en cas de tremblement de terre. [27]

I.3. Méthodes et techniques de renforcement

I.3.1. Méthodes de réparation non structurales

La présence de fissures dans un élément structural peut entraîner des problèmes graves s'ils sont sous-estimés. Cela peut conduire à une perte de capacité portante ou à un dysfonctionnement qui affecte l'intégrité de toute la structure. Une répartition déséquilibrée des charges contribue à la détérioration du béton et à l'exposition des armatures métalliques, favorisant ainsi leur corrosion. Dans des cas avancés, cela peut nécessiter des réparations plus coûteuses et complexes à mettre en œuvre. Ainsi, des méthodes de réparation doivent être appliquées dès que possible pour éviter des interventions plus onéreuses à l'avenir. En cas de nécessité de réparations plus importantes, des techniques plus légères peuvent être utilisées pour restaurer la surface et garantir la solidité de la structure.

La réparation par reprise du béton dégradé suit généralement l'ordre chronologique suivant: [28]

- Préparation de la surface de béton à réparer,
- Traitement des armatures éventuellement exposées,
- Mise en œuvre d'un ou de plusieurs matériaux d'apport,
- Protection du parement ainsi réparé.

I.3.2. Méthodes de réparation structurale

I.3.2.1. Réparation par béton projeté

Cette méthode est couramment utilisée pour renforcer les structures ou les éléments structurels défaillants, nécessitant une mise en œuvre minutieuse. Le béton projeté peut éventuellement être combiné avec une autre technique de réparation, comme l'ajout d'armatures en acier. La projection de béton peut être effectuée soit par voie sèche, soit par voie humide. [29].



Figure I.13: Renforcement au moyen de béton projeté[29].

a) Projection par voie sèche :

Les ingrédients secs, tels que les granulats, le ciment, ainsi que parfois un accélérateur de prise et des adjuvants, sont mélangés dans un malaxeur, puis propulsés vers la lance de projection à l'aide d'air comprimé. Cette lance est couplée à une lance de projection d'eau, et éventuellement d'un accélérateur de prise liquide.. [30]

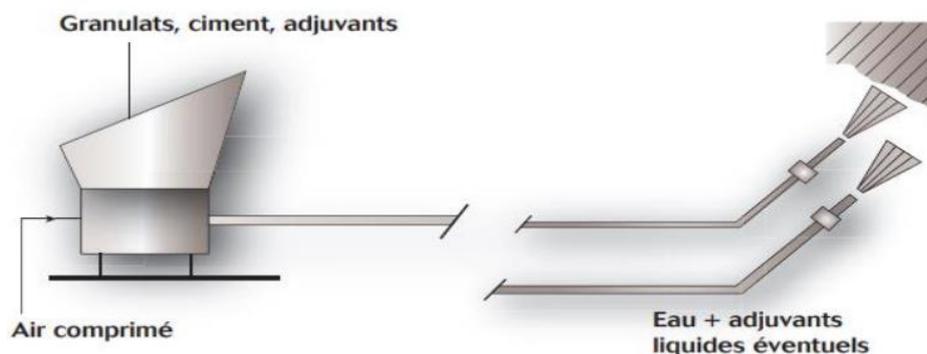


Figure I.14: Projection par voie sèche [30]

b) Projection par voie mouillée :

Après le malaxage, le mélange comprenant l'eau est stocké dans une trémie. Il est ensuite acheminé jusqu'à la lance de projection à l'aide d'une pompe, puis projeté à l'aide d'air comprimé.. [30]

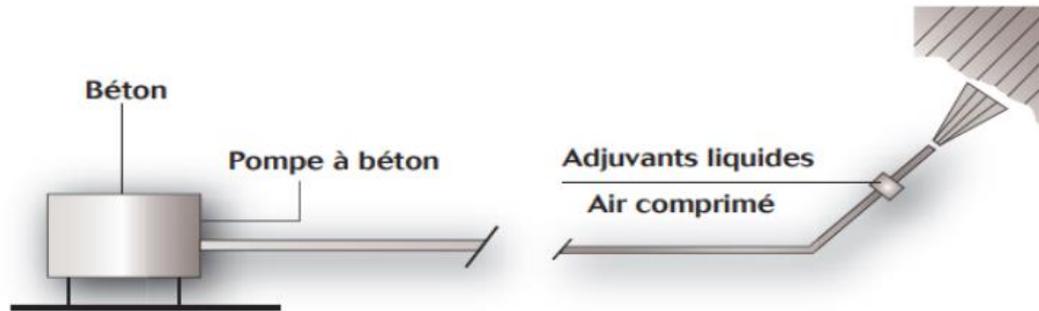


Figure I.15: Projection par voie humide [30]

I.3.2.2. Réparation par adjonction d'armature complémentaire

Lorsqu'il est nécessaire de remplacer des armatures corrodées ou endommagées, des armatures complémentaires doivent être envisagées. Cette approche peut également être utilisée pour renforcer une structure existante. Les armatures existantes préservées doivent être entretenues pour prévenir leur détérioration continue.

Les armatures supplémentaires doivent contrer la fissuration et contribuer à la résistance des sections renforcées. Elles peuvent être intégrées à la géométrie de l'élément. La protection des armatures supplémentaires est assurée par une couche de béton coulé ou projeté.

Dans tous les cas, il est nécessaire de garantir un enrobage minimal équivalent au diamètre des barres d'armature.. [31]

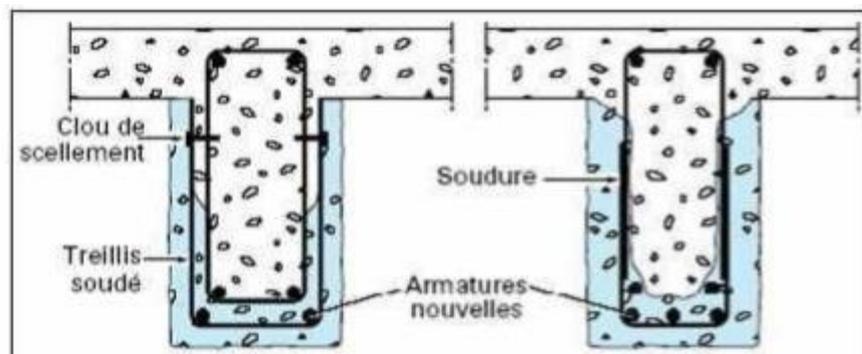


Figure I.16: Adjonction d'armatures complémentaires . [31]

I.3.2.3. Réparation par précontrainte additionnelle

Cette méthode implique le renforcement d'une structure en utilisant des câbles de précontrainte ou des torons gainés et graissés, généralement positionnés à l'extérieur du béton. La précontrainte supplémentaire introduit des sollicitations complémentaires dans la structure, permettant de compenser les défauts de dimensionnement ou de conception, ainsi que les charges supplémentaires résultant de modifications dans les conditions d'utilisation ou de chargement. Les nouveaux câbles ou torons doivent apporter une compression pour recomprimer les zones tendues, sans créer de contraintes excessives dans les zones déjà comprimées. [30]



Figure I.17: Application de la précontrainte additionnelle pour la réparation des ponts à poutres sous chaussée [30]

I.3.2.4. Renforcement par collage de plats métalliques

Cette méthode repose sur la liaison entre une plaque d'acier et la surface du béton afin de transférer les charges et d'accroître la résistance et la rigidité de la structure. Elle est réputée pour son économie et ne modifie pas la forme ni les dimensions de la structure[25]

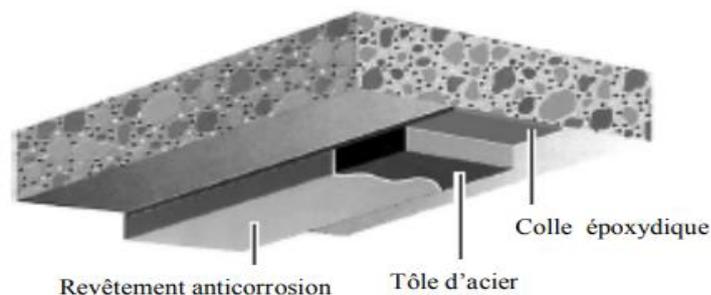


Figure I.18: Application de plats métalliques selon le procédé L'Hermite [32]

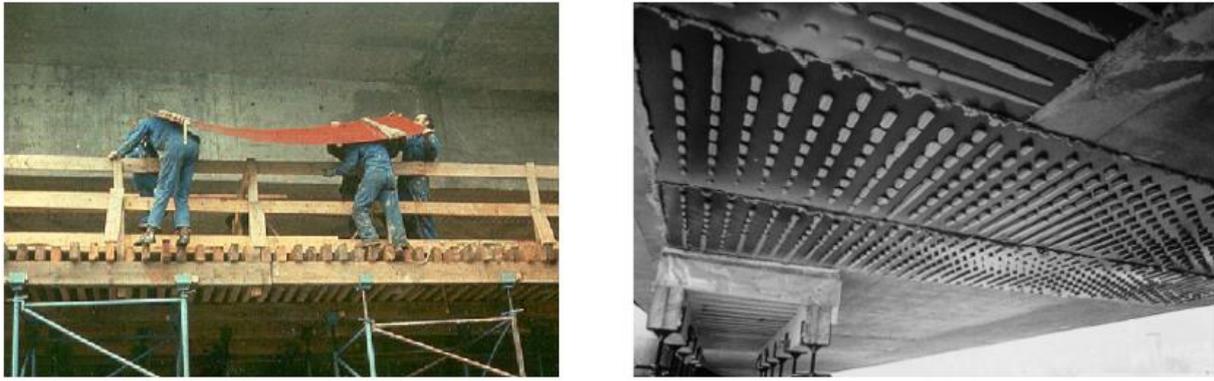


Figure 1.19: Tôles collées ; (a) difficulté de manutention ; (b) Renforcement du viaduc de Terrenoire par tôles collées perforées -Brevet Freyssinet [33]

1.4. Réparation et renforcement par collage des matériaux composites

1.4.1. Utilisation des composites dans le génie civil

Les matériaux composites sont largement employés dans l'aérospatiale, les transports aériens et terrestres, ainsi que dans la fabrication d'articles de sport. Cependant, leur utilisation dans le génie civil est encore relativement limitée. Dans ce domaine, l'utilisation de renforts textiles au sein de composites avec des matrices souples, telles que les thermoplastiques, est bien connue, notamment dans la construction, où ils sont souvent utilisés sous forme d'éléments de couverture métallo-textiles.

En contraste, l'utilisation de matériaux composites associés à des matrices rigides (thermodurcissables) est moins répandue. Dans ces cas, ces composites sont généralement employés comme armatures (tendons de précontrainte, barres ou grilles d'armatures) ou sous forme de plaques, lamelles ou tissus pour la réhabilitation de structures existantes.

La réhabilitation de structures existantes à l'aide de matériaux composites renforcés de fibres (FRP) représente une autre utilisation potentielle de ces matériaux dans le domaine du génie civil. Actuellement, la recherche dans ce domaine s'intensifie et les applications des matériaux composites dans le génie civil se multiplient. [34]

1.4.2. Remplacement des tôles métalliques par des matériaux composites

Dans le domaine du génie civil, une transition s'est opérée après la période allant de 1960 à 1990. La construction intensive d'ouvrages d'art, de grands immeubles et d'installations industrielles a cédé la place à une phase de consolidation, caractérisée par des opérations de maintenance. Ces opérations se concentrent souvent sur le renforcement des structures, que ce

soit pour des réparations suite à des désordres ou pour se conformer à des normes de plus en plus strictes. De nombreux exemples de telles interventions existent. Jusqu'à présent, l'une des méthodes de renforcement les plus répandues dans le monde est le collage externe de plaques métalliques, selon le procédé L'Hermite, en raison des avantages qu'il offre.

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

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

- L'acier est sensible à l'oxydation, ce qui signifie qu'il nécessite une protection et un entretien attentif.
- Même sous une faible épaisseur, les tôles ne peuvent pas exploiter pleinement leur résistance en traction lorsqu'elles sont sollicitées le long d'une seule face.
- En raison de la raideur des tôles, une préparation spécifique de la surface à traiter est nécessaire pour garantir une surface parfaitement plane, assurant ainsi une uniformité de l'épaisseur de l'adhésif.
- Un collage sous pression, généralement réalisé à l'aide de vérins, est nécessaire pour garantir une adhérence suffisante et pour prévenir la formation de bulles d'air dans la couche de résine de collage.
- La manipulation des plaques sur le chantier est compliquée en raison de leur grande taille lors de la mise en place. De plus, les longueurs des tôles sont limitées, ce qui nécessite la création de joints entre deux plaques successives pour des portées trop importantes.

Ces défis, combinés aux besoins de renforcement des bâtiments dans les zones à risque sismique, ont encouragé la recherche et le développement de l'utilisation de matériaux composites à base de fibres de carbone pour renforcer ou réparer les structures du génie civil. Bien que la réparation par tôle soit souvent efficace et éprouvée, il est pertinent de proposer une alternative dans les cas où des conditions environnementales difficiles ou des problèmes de mise en œuvre pourraient compromettre son efficacité.[34]

1.4.3. Application des matériaux composites pour la réparation et le renforcement des ouvrages en béton armé

- **Réparation de pont, renforcement structural**

Bandes de polymères renforcés de fibres de carbone (PRC) pour le renforcement des ouvrages de construction. Ces fibres peuvent produire une haute résistance capable de soutenir la structure en béton [35]



Figure I.20: renforcement en fibres de carbone [36]

- **Mise en oeuvre**

Dans le cas de renfort en lamelle de fibre de carbone, en général on applique l'adhésif époxy en couche de 1 mm sur la surface déjà préparée ainsi que sur la face supérieure des lamelles, préalablement traitées en usine pour avoir la rugosité adéquate, et qui doivent également être propres.

Dans le délai du temps d'application de la résine époxy, les lamelles seront posées à l'aide d'un rouleau pour exercer une pression. L'excédent de résine doit être nettoyé.

Il est recommandé d'ancrer les lamelles dans un béton sain et de disposer de la longueur nécessaire [36]

- **Préparation de la surface du béton**

La surface du béton doit être bien préparée afin d'éviter la rupture à l'interface résine béton par suivre un procédé adéquat.

Une bonne préparation extérieure du béton exige une importante maintenance, et que les surfaces de béton irrégulier sont réglés. [36]

- **Préparation du support :**

Elle consiste au sablage, on prépare la structure à recevoir le renforcement et assurer l'adhérence entre les différents matériaux.



Figure I.21: Décapage [36]

- nettoyage et brossage des surfaces qui peuvent être humides ;



Figure I.22: Brossage de l'élément [36]

- Préparation des fissures par injection de la résine de réparation ;



Figure I.23: Injection de la résine [36]

- Préparation de la surface du renfort :

Pour les plaques de composites, la rupture peut se produire aussi à l'interface de composite résine si la surface de la plaque de carbone n'est pas correctement préparé (par exemple déplacement inadéquat, des impuretés comme par exemple : graisse sur la surface).



Figure I.24: lissage de la surface de renforcement [36]

- Pour les tissus



Figure I.25: Découpage de la tissu [36]

- Application au rouleau, d'une couche de résine d'accrochage sur la surface à renforcer



Figure I.26: Application et accrochage [36]

- Mise en place de la bande ou du tissu ;



Figure I.27: Enroulement par les fibres [36]

Application au rouleau, d'une couche de résine d'accrochage sur la surface extérieure :

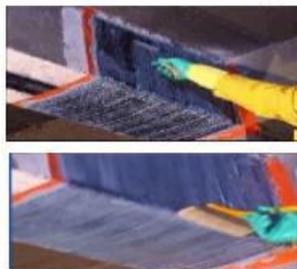


Figure I.28: Application de la couche d'accrochage[36]

renfort éventuel de la fixation des extrémités par mise en œuvre de chevilles TFC .

- passage de la bande dans l'imprégnateur .

- passage rouleau du maroufler imprégnateur. [36]

1.5. Conclusion

En conclusion, le diagnostic précis des maladies structurelles est essentiel pour choisir les méthodes de renforcement et de réparation adéquates. Il est crucial de différencier les pathologies, d'identifier leurs causes et de prévoir leur évolution. Le choix des matériaux et des techniques de renforcement doit être basé sur la nature et l'ampleur des dommages, ainsi que sur des considérations économiques et logistiques.

La fissuration, bien que courante, est souvent difficile à interpréter visuellement. Il est donc primordial de déterminer à quel moment elle affecte la capacité structurelle. Lorsque la stabilité de l'ouvrage est compromise, des méthodes structurelles doivent être envisagées pour réparer ou renforcer la structure. La réparation vise à restaurer les caractéristiques initiales de la structure, tandis que le renforcement vise à consolider et à améliorer ses performances.

Les matériaux composites, offrent de nombreux avantages en termes de flexibilité, de légèreté et de résistance mécanique. Leur utilisation dans le renforcement et la réhabilitation des structures en béton armé constitue une alternative intéressante aux méthodes traditionnelles.

CHAPITRE 02:

Généralité

sur

les matériaux composite

II.1. Introduction

Le développement des nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs. Ceux-ci veulent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisées, mais dans certains cas, ils doivent complètement repenser le problème et envisager de nouveaux matériaux. En effet, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt des nouvelles associations de matériaux. L'un des résultats de ces associations est l'aboutissement à un matériau composite.

II.2. Définition du matériau composite

Un matériau composite est formé par la combinaison de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est synergique, conduisant à un matériau dont les performances sont supérieures à celles des composants individuels.

Généralement, un matériau composite se compose d'une ou plusieurs phases discontinues intégrées dans une phase continue. La phase discontinue, souvent désignée sous le nom de renfort ou de matériau renforçant, possède des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice.[37]

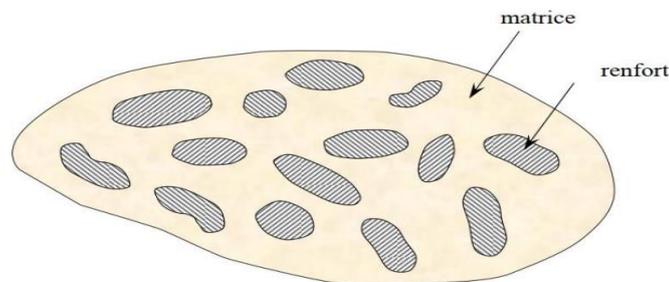


Figure II.1 : Matériau composite[38]

II.3. Avantages et inconvénients des matériaux composites

Les avantages [39][40][41]

- Résistance et rigidité spécifiques extrêmement élevées.
- Faible densité

- Résistance dynamique et à la fatigue extrêmement élevée
- Dilatation thermique minimale
- Excellente résistance à la corrosion
- Dégradation à différents stades
- Excellente isolation thermique
- Possibilité de prendre plusieurs formes (pièces complexes)
- Bonne tenue au feu (attention aux dégagements toxiques) Les points suivants doivent être pris en compte en termes de construction
- Moins de composants grâce à une construction intégrée
- Moins de déchets
- Facilité de mise en forme

Les inconvénients [39][40][41]

- Le coût du matériau et de la fabrication
- La tolérance aux dommages des matériaux à matrice fragile
- Les difficultés de conception et de dimensionnement
- Le recyclage
- La sensibilité à la chaleur

II.4. Les éléments constituant le matériau composite à base des fibres (les fibres, les résines)

II.4.1. LES RENFORTS

Le but des renforts dans les matériaux composites est essentiellement d'accroître leurs propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la rupture, dureté, ect.) et d'améliorer des propriétés physiques, et les propriétés électriques. Outre les propriétés élevées qu'ils

procurent, les caractéristiques recherchées dans les renforts sont une masse volumique faible, une compatibilité avec les matrices et une facilité de mise en œuvre. Les renforts peuvent provenir d'origines diverses (animale, végétale, synthétique, ect...)[42]

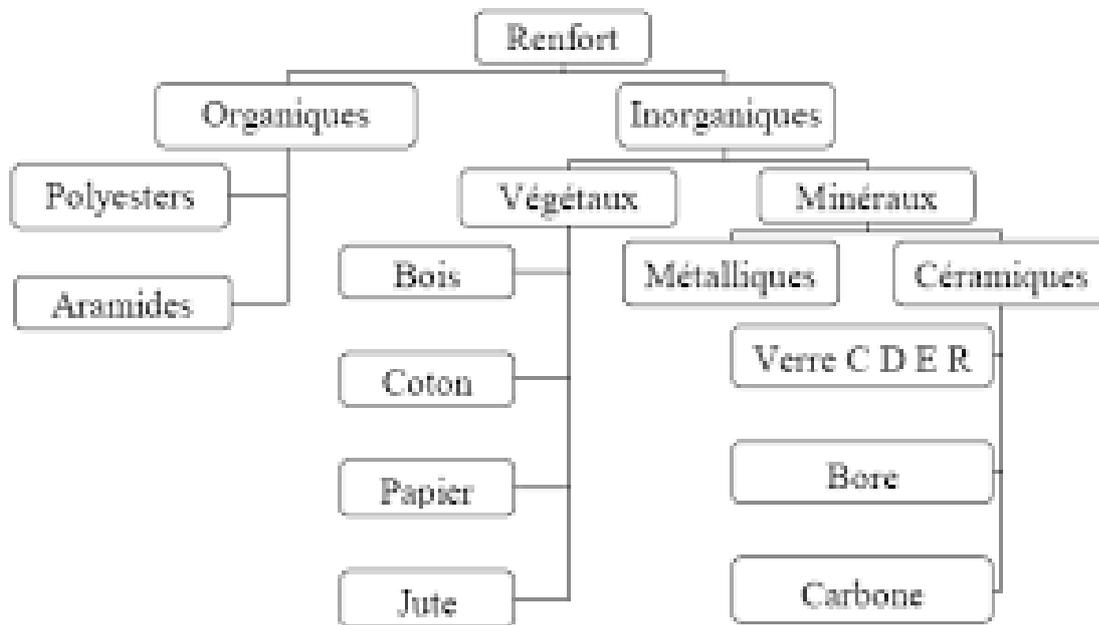


Figure II.2: Les différents types de renfort de base [43]

a) Les fibres

Les fibres se trouvent sous forme de filaments de diverses longueurs, chacune ayant des qualités spécifiques recherchées, notamment :

- Bonnes caractéristiques mécaniques ;
- Légèreté, résistance thermique, compatibilité avec les résines ;
- Adaptabilité aux procédés de mise en œuvre ;
- Faible prix.
- Les fibres se présentent sous diverses formes commerciales :
- Linéiques (fils, mèches, ... etc.) ;
- Tissus surfaciques (tissus simples, mats, ... etc.) ;
- Multidirectionnelles (tresses, tissus complexes, ...etc.).

Il existe aussi des fibres courtes, mesurant de 1 à 2 mm, qui sont dispersées dans la matrice, ainsi que des fils coupés d'une longueur de 15 à 50 mm Leur utilisation reste limitée en raison des défis de fabrication.[37]

Les principales fibres

➤ Fibres de verre

En raison de son excellent rapport entre performances mécaniques et coût, la fibre de verre est la plus largement utilisée et occupe une place prépondérante parmi les renforts utilisés dans la fabrication des matériaux composites.

Les fibres de verre sont produites à partir d'un mélange contenant de la silice (SiO_2), qui est fondu à une température de 1200°C , puis étiré à travers une filière en platine. Les filaments sont étirés avant d'être refroidis à un diamètre compris entre 5 et $13\ \mu\text{m}$, à une vitesse de 60 m/s. En modifiant la composition du mélange (silice, kaolin, chaux, etc.), différents types de verre peuvent être obtenus.[37]

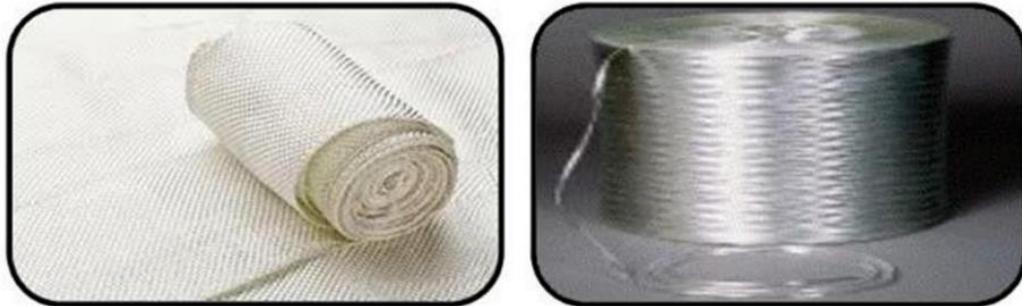


Figure II.3: Exemple de fibre de verre [44]

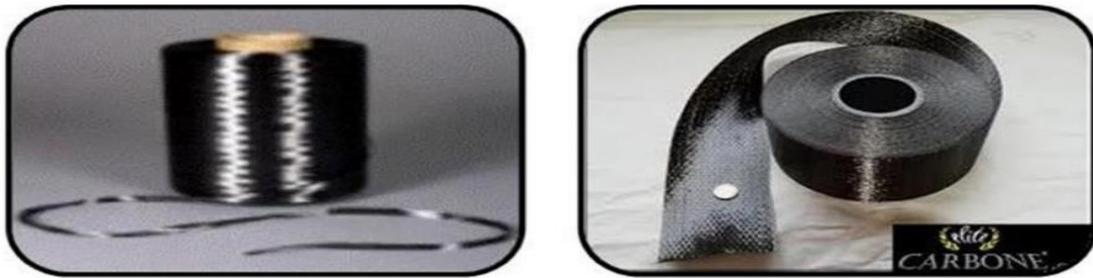
TableauII.1: Propriétés des fibres de Verre[45]

Propriétésentraction	VerreE	VerreR	VerreS
Rt(MPa)	3400	4400	4900
EoT(MPa)	7300	8600	87000
AR(%)	4.9	5.2	-----
Masse volumique (g/cm^3)	2.54	2.55	2.54

Fibre de carbone

Les fibres de carbone sont réputées pour leurs propriétés mécaniques exceptionnelles et sont fabriquées à partir d'un polymère de base appelé précurseur. Actuellement, les fibres

les plus couramment utilisées sont des fibres acryliques fabriquées à partir de polyacrylonitrile. La qualité des fibres de carbone finales dépend largement des caractéristiques du précurseur. Le processus de fabrication implique la décomposition thermique des fibres acryliques, sans fusion, ce qui conduit à leur graphitisation. Le brai, qui est un sous-produit de la raffinerie de pétrole ou de la houille, est également utilisé pour produire des fibres de carbone.[46]



FigureII.4: Exemple de fibre de carbone [44]

TableauII.2.Propriétésdes fibres de carbone[45]

Propriétésentraction	HR		IM	HM	
Rt(MPa)	300 à 5000	4000 à 4500	47000 à 52000	2000 à 2500	1100 à 2000
EoT(MPa)	220000 à 240000	235000à 250000	275000 à 300000	350000 à 400000	450000à 500000
AR(%)	1.2 à1.5	1.6 à1.8	1.4à1. 6	0.5 à0.7	0.3 à0.5
Massevolumique (g/cm³)	1.75 à1.8	1.75 à1.8	1.7 à1.8	1.8 à1.85	1.9 à1.95

RT, EoTet ARsont respectivement la résistance à la rupture; le module de Young etl'allongement la rupture.

Fibre aramides

La fibre d'aramide est dérivée de la chimie des polyamides aromatiques. On distingue deux types de fibres d'aramide avec des rigidités différentes : les fibres de bas module, utilisées dans la fabrication de câbles et de gilets pare-balles, et les fibres de haut module, employées pour le renforcement des composites à haute performance.[47]

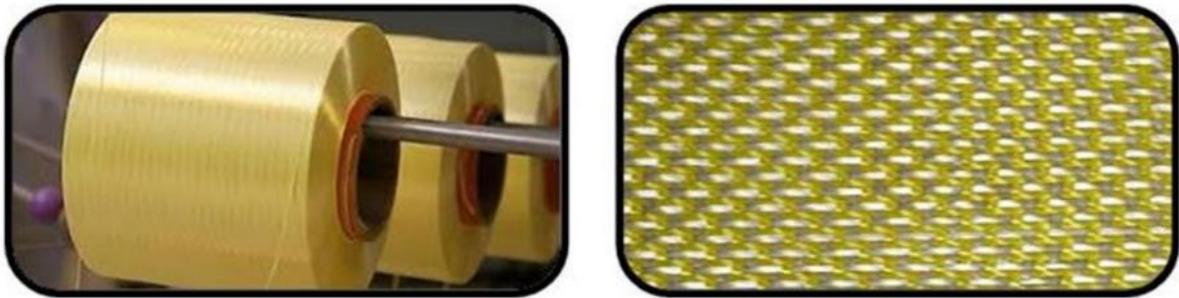


Figure II.5: Exemple de fibre d'aramide[44]

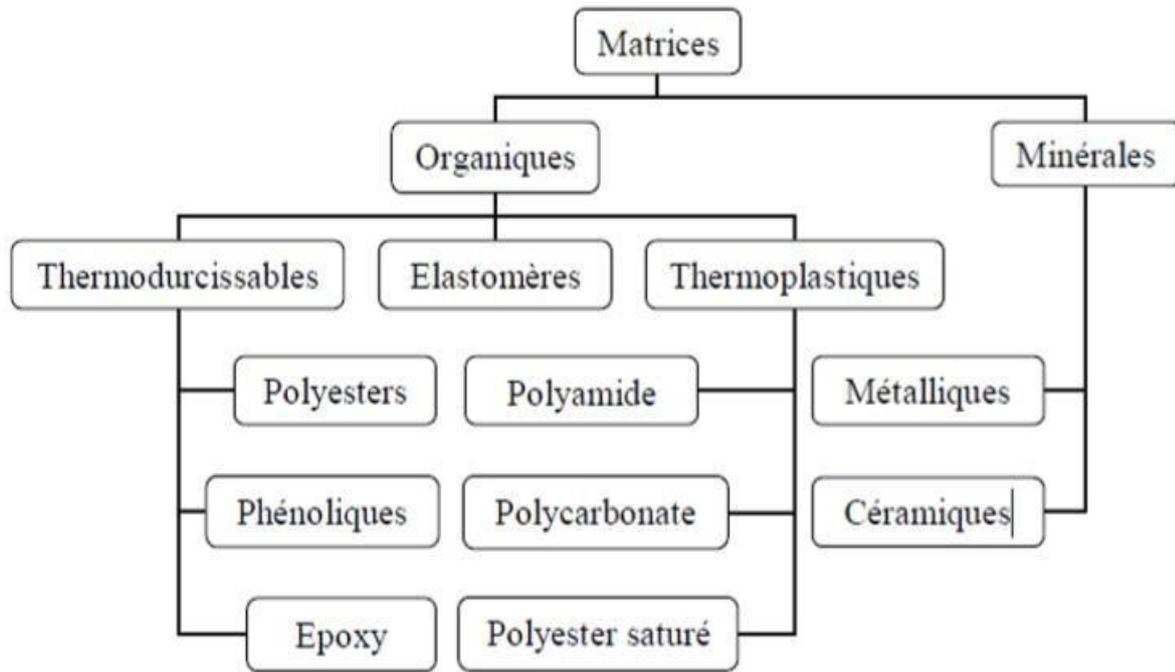
Tableau II.3. Propriétés des fibres d'aramides[45]

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

II.4.2. Les matrices

Cette étape est essentielle pour assurer la liaison entre les différents éléments constitutifs. Elle comprend une résine (polyester, époxy, etc.) et une charge (carbonate de calcium, graphite, etc.).

Leur fonction est de lier les renforts, de distribuer les charges (contraintes, résistance à la traction et rigidité), et de fournir une protection chimique contre les agents extérieurs agressifs tels que les acides, l'humidité et la corrosion. De plus, elles donnent forme au produit final. Dans le cas des composites plastiques, la matrice est par définition un polymère ou une résine organique. Le choix de la matrice dépend de l'application prévue pour le matériau composite. [48]



La figure II.2:Présente les différentes familles de matrice [43]

II.4.2.1. Résines thermodurcissables

Les résines les plus couramment utilisées dans les travaux de renforcement et de réhabilitation des ouvrages de génie civil sont le polyester, l'époxy et le phénolique. Ces résines thermodurcissables surpassent largement les résines thermoplastiques en termes de résistance mécanique et chimique, de stabilité thermique et de durabilité. En particulier, dans le domaine du génie civil et spécifiquement dans le renforcement et la réhabilitation des structures, les résines thermodurcissables les plus utilisées sont les époxydes et les phénoliques.[49]

Tableau II.4: Caractéristiques des résines thermodurcissables[50]

Propriétés	Polyesters	Phénoliques	Epoxydes
Densité (g/cm ³)	1.2	1.24	1.2
Module d'élasticité (GPa)	4	2.5	3

Résistance à la traction (MPa)	65	40	90
Allongement (%)	2.5	1.8	8

II.4.2.2. Résines thermoplastiques

La famille des résines thermoplastiques est vaste et peut être divisée en deux catégories: les plastiques courants et les plastiques techniques.

Les plastiques courants sont souvent utilisés dans des processus d'injection pour produire des objets moulés, ou par extrusion pour fabriquer des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc.

Les résines thermoplastiques ont la particularité de pouvoir être remodelées plusieurs fois grâce à des cycles de chauffage et de refroidissement successifs, ce qui les rend recyclables et récupérables.

Leur structure se compose de chaînes linéaires, nécessitant un chauffage pour les mettre en forme et un refroidissement pour les stabiliser.[51]

Les principales résines thermoplastiques utilisées sont les suivantes :

- Le polyamide : connu pour sa résistance aux chocs, sa bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.
- Le polytéraphthalate éthylénique et butylique : apprécié pour sa bonne rigidité.
- Le polycarbonate : réputé pour sa résistance aux chocs.
- Les polysulfures de phénylène : reconnus pour leur résistance à l'hydrolyse.
- Les polyoxyméthylènes : appréciés pour leur bonne tenue à la fatigue.
- Les polysulfones : réputées pour leur bonne stabilité chimique.
- Le polypropylène : relativement stable en termes de température, mais inflammable.

Les résines thermoplastiques présentent un intérêt majeur en raison de leur coût relativement bas, qui découle à la fois de la disponibilité des

matières premières et des processus de fabrication. Cependant, ce coût réduit est souvent associé à des propriétés mécaniques et thermomécaniques moins élevées.

II.4.2.3. Comparaison entre ces deux types de résines[52]

TableauII.5 :Comparaison entre les deux types de résine [52]

Thermoplastiques	Thermodurcissables
Solideprêtàl'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Illimité	Réduit
Difficile	Aisée
Chauffage+refroidissement	Chauffagecontinue
Court	Long(polymérisation)
Assez bonne	Limitée
Réduite	Meilleure
Recyclables	Perdus ou utilisés encharges
Propreté	Emanationsdesolvants

II.5 L'utilisation des composites dans le domaine de génie civil

II.5.1. Composites dans les bâtiments [53]

II.5.1.1. Mécanique

L'ajout de divers types de fibres a permis d'améliorer les qualités des mortiers et du béton de ciment, donnant ainsi naissance au béton armé et précontraint, à l'amiante-ciment, et au béton plaqué, entre autres. Le renforcement est efficace lorsque certaines conditions de déformabilité relative permettent de transmettre aux fibres des efforts en adéquation avec leur résistance. De plus, les conditions thermiques extrêmes doivent être compatibles avec les coefficients de dilatation, les modules d'élasticité et les résistances mécaniques des matériaux associés.

Pour améliorer la résistance du béton à l'usure, on peut recourir à des revêtements superficiels en plastique renforcé ou à l'ajout de poudres très dures telles que le carborundum dans le béton.

II.5.1.2. Amélioration de la sécurité

La défaillance d'un produit utilisé dans la construction peut présenter un risque potentiellement dangereux, mais pas toujours. Il est souvent essentiel, pour diverses raisons, que la défaillance d'un élément de structure ne se traduise pas par la chute de fragments ou de pièces dangereuses. Cette catégorie comprend notamment les vitrages renforcés, les vitrages de sécurité et divers produits verriers conçus pour les ouvertures de fenêtres.

II.5.1.3. Amélioration de certaines propriétés physique

Cette catégorie englobe les combinaisons de matériaux qui peuvent remplir des fonctions spécifiques. Par exemple, un panneau en alliage qui est à la fois imperméable à l'eau et à l'air, avec un coefficient de transmission thermique K spécifique, une résistance mécanique élevée aux charges statiques et aux chocs, ainsi qu'un aspect esthétique tant pour la face intérieure que pour la face extérieure. Il doit également présenter une bonne résistance aux agents agressifs extérieurs et une bonne durabilité face au gel et aux rayons du soleil.

II.6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mieux étudier les matériaux composites en général, de constater leurs importance en génie civil spécifiquement, et de connaître l'évolution de ces matériaux vers l'écologique.

Le progrès scientifique et la recherche ne cesse d'optimiser ces matériaux pour bénéficier de leurs propriétés.

Chapitre 03 :

Comportement des poutres

En

béton armé

renforcées par

matériaux composites

III. 1. Introduction

L'utilisation de matériaux composites pour le renforcement concerne les éléments soumis à la flexion, dans le but d'améliorer leurs capacités de charge en termes de flèche et/ou d'effort tranchant. Ce processus implique l'application de plaques composites sur la face inférieure en tension d'une poutre en béton afin de renforcer sa structure. L'adhésion de ces lamelles ou plaques composites à la surface de la structure en béton armé entraîne une modification du comportement structural par rapport à une structure non renforcée.

Le but de ce chapitre est d'analyser le comportement mécanique des poutres non renforcées, puis de se pencher plus en détail sur le comportement mécanique, les mécanismes de rupture et le décollement du renfort dans l'élément renforcé. Une attention particulière sera accordée à la zone d'interaction entre le béton et le composite, appelée interface, ainsi qu'aux différentes théories de déversement permettant de modéliser les contraintes à l'interface.

III.2. Comportements des poutres en béton armé renforcées par des plaques en matériaux composites sous chargement statique

L'usage de tissus de matériaux composites (FRP) conjugués à des colles époxy sur les surfaces tendues ou latérales représente une méthode hautement efficace pour renforcer les poutres en béton armé, surtout celles qui sont faiblement armées.

En collant le tissu sur les surfaces tendues, la résistance ultime des poutres renforcées est accrue et la déformation des structures est réduite, ce qui augmente leur rigidité (voir Figure III.1), limitant ainsi la propagation des fissures. Cette réduction de la déformation contribue à réduire la corrosion des armatures et à améliorer la durabilité des structures. L'une des applications les plus courantes des matériaux composites pour le renforcement des structures en béton armé concerne celles soumises à des sollicitations de flexion ou d'effort tranchant. [34]

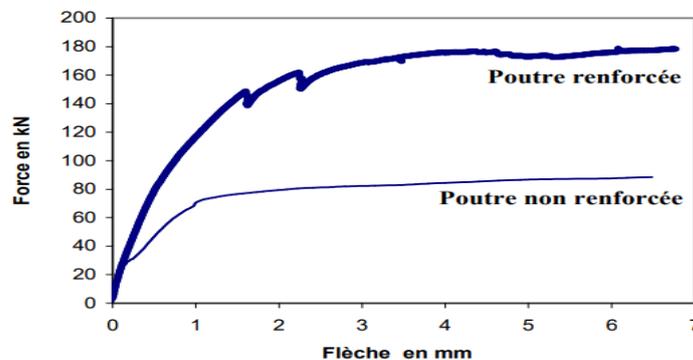


Figure III.1: Comparaison de comportement entre les poutres renforcées et celles non renforcées (étude présente)[61]

III. 2. 1. Comportement mécanique d'une section de poutre renforcée

L'utilisation du collage est la méthode privilégiée pour fixer les matériaux composites sur une surface en béton. Cette méthode permet une répartition uniforme des contraintes et nécessite des équipements légers. Cependant, bien que largement adoptées dans l'aéronautique ou l'automobile, les techniques de fixation par collage ont du mal à s'imposer dans le domaine du génie civil, qui a une préférence pour les connexions mécaniques par clouage ou vissage.

Malgré cela, la fixation des renforts en matériaux composites par collage demeure une méthode efficace. Toutefois, il est observé que la défaillance des systèmes collés survient principalement par décollement des composites, ce qui peut entraîner une rupture fragile. Cela est particulièrement préoccupant dans le contexte d'un renforcement parasismique, où la ductilité de l'élément est essentielle pour dissiper l'énergie sismique.

Ainsi, l'optimisation du renforcement par matériaux composites collés en incluant des systèmes d'ancrage peut être une approche constructive intéressante. En particulier, la jonction entre deux éléments est souvent une zone critique ; il est donc crucial d'assurer une certaine continuité du système de renforcement entre ces deux éléments. [34]

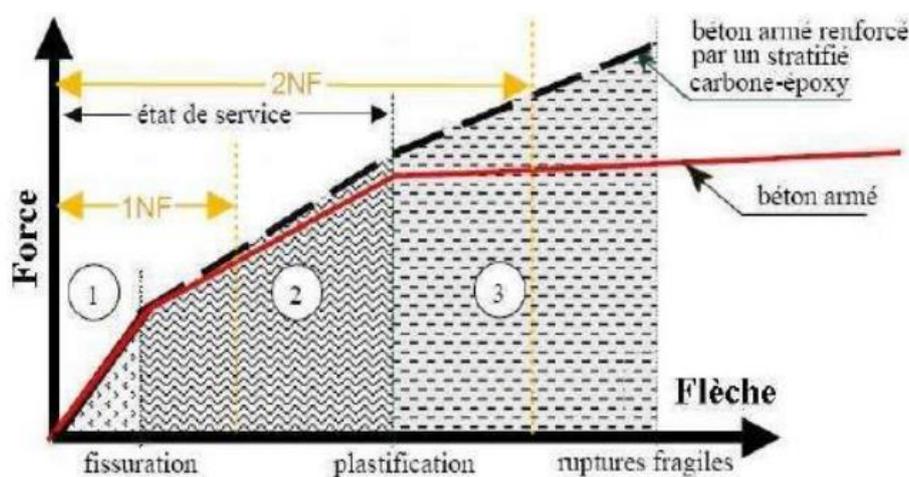


Figure III.2 : Les trois phases de comportement d'une poutre en béton armé fléchie renforcée par un stratifié en composite. [34]

Le comportement structural d'une poutre renforcée dépend de l'interaction de chacune des sections de la figure (Figure III.3).

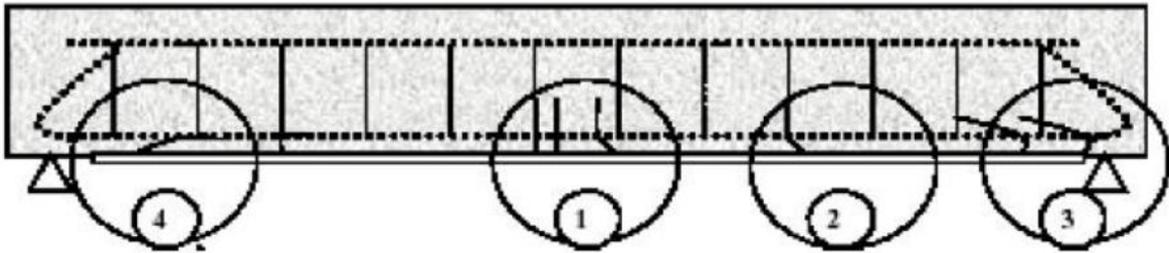


Figure III.3 : *comportement structural d'une poutre renforcée [34]*

Nous allons décrire plus en détail le comportement mécanique de chaque section (section centrale, intermédiaire et d'extrémité) . [34]

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

La section intermédiaire (2) : Dans cette partie, les contraintes de cisaillement ne sont pas négligeables. Deux facteurs peuvent donc altérer l'équilibre de la section : les propriétés mécaniques et géométriques du joint de colle (module et épaisseur) et l'intensité des contraintes. Pour la section, les interactions de ces paramètres entraînent une diminution des efforts dans le composite. Cette diminution des efforts conduit alors à une redistribution des charges dans la section vers les armatures en acier.

La section d'extrémités (3 et 4) : Cette partie est exposée à un couple d'efforts tel que défini par plusieurs chercheurs, qui ont mis en évidence la présence de contraintes excessives à l'extrémité et une sur-contrainte normale localisée à l'extrémité de la plaque. La présence de ces sur-contraintes localisées influence notamment le mode de rupture. Deux scénarios peuvent se produire :

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

III.2.2. Mécanisme de rupture des poutres renforcées par matériaux composites

Dans le cas de poutres renforcées soumises à des sollicitations de flexion, quatre modes de rupture sont fréquemment observés dans les études expérimentales : la rupture due à la flexion, la rupture due à l'effort tranchant, la rupture due au décollement du tissu et la rupture de l'enrobage du béton (voir Figure III.4).

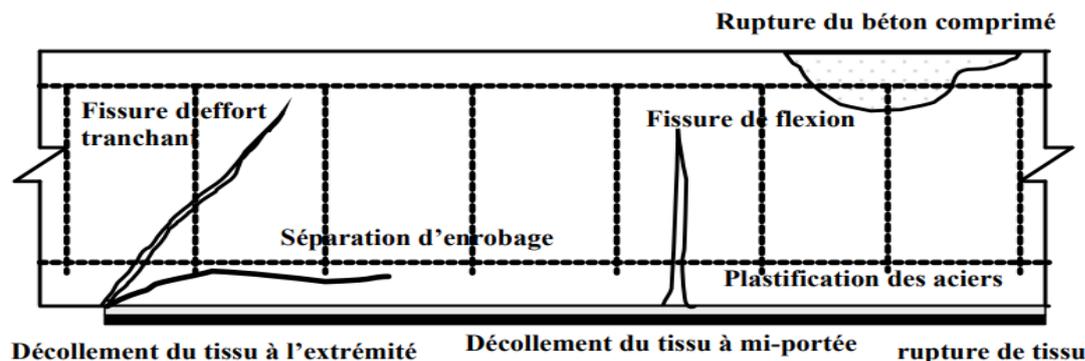


Figure III.4 : Modes de rupture des poutres renforcées de matériaux composites[34]

III.2.2.1. Rupture due à la flexion

Les modes de rupture en flexion des poutres en béton armé renforcées par une plaque en composite se manifestent soit par la rupture du composite, une plastification significative des armatures tendues, ou encore par l'écrasement du béton en compression..[62]

III.2.2.2. Rupture due au cisaillement

La rupture par effort tranchant des poutres survient lorsque la résistance au cisaillement des poutres non renforcées est insuffisante. Les fissures se forment initialement aux extrémités de la plaque longitudinale et se propagent en direction du centre de la poutre. Cette situation découle de la concentration des contraintes résultant de la discontinuité du tissu..[62]

III.2.2.3 Rupture due au décollement

La rupture des poutres renforcées due au décollement constitue la principale cause de défaillance des éléments renforcés par le collage de plaques en composite. Le décollement peut se produire dans six zones différentes de la poutre : entre l'armature tendue et

l'enrobage en béton, à l'intérieur de l'enrobage en béton, entre le béton et l'adhésif du composite, entre l'adhésif et la plaque composite, à l'intérieur de l'adhésif, et dans le composite lui-même.

Les mécanismes de rupture les plus fréquemment observés, dus au décollement, sont la séparation de l'enrobage en béton entre l'armature tendue et le béton, ainsi que le décollement du composite, soit à l'extrémité, soit à mi-portée de la poutre..[62]

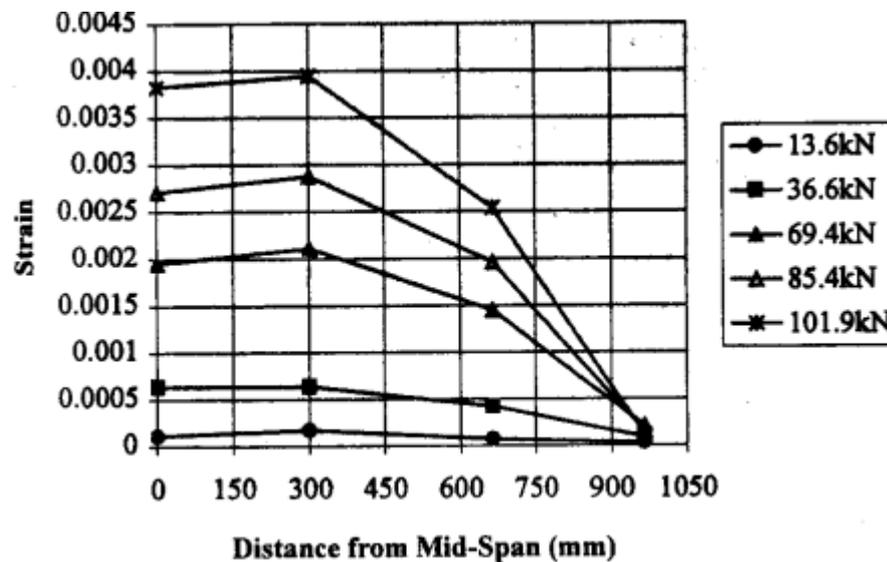


Figure III.5 : Distribution de la déformation d'un tissu [60]

III.2.3. Facteurs ayant une influence sur le comportement des poutres renforcées

Les poutres en béton armé renforcées par des matériaux composites sont composées de quatre éléments : le béton, les armatures, la colle et le tissu. Le béton présente des comportements distincts en traction et en compression. Les armatures adoptent un comportement élasto-plastique.

La colle assure le transfert des contraintes de cisaillement entre le béton et le composite. Des modifications dans les caractéristiques ou la quantité de chacun de ces quatre matériaux, telles que la résistance du béton, le taux de renforcement des armatures tendues, les différents types de tissu, ainsi que l'épaisseur de la colle ou du tissu, peuvent influencer la réponse des structures renforcées. De plus, des paramètres géométriques tels que la proportion de la distance entre la charge et l'appui par rapport à la hauteur de la poutre, ainsi que la longueur du tissu, exercent également un impact sur le comportement des structures renforcées. [63]

III.2.3.1. Influence du rapport de la distance entre la charge et l'appui

par rapport à la hauteur de la section (a_v / h)

Le rapport entre la distance entre la charge et l'appui et la hauteur de la section (a_v/h , voir Figure III.6) est un paramètre crucial en ce qui concerne le mode de rupture des poutres renforcées. Une petite valeur de a_v/h entraîne souvent une rupture brutale par effort tranchant. Pour les poutres en béton armé, un rapport a_v/h supérieur à 6 conduit généralement à une rupture par flexion, tandis qu'un rapport a_v/h compris entre 2,5 et 6 conduit à une rupture due à une combinaison du moment de flexion et de l'effort tranchant. [54].

Dans le projet de recherche ROBUST relatif aux poutres en béton armé renforcées par matériaux composites [54], des poutres ayant un rapport variable: $a_v / h = 3,0, 3,4$ et $4,0 \sim 7,72$ respectivement, ont été étudiées.

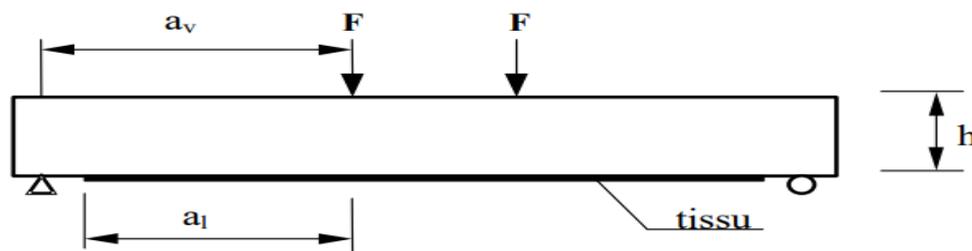


Figure III.6 : Définition des paramètres [63]

Les résultats des essais sont illustrés sur la Figure III.7. On observe que plus les valeurs du rapport a_v/h sont élevées, plus les moments de flexion ultimes sont élevés. Cependant, lorsque ce rapport a_v/h dépasse 6, son influence sur la résistance ultime est pratiquement nulle. Ainsi, pour éviter une rupture prématurée due au décollement du tissu, l'ancrage du tissu aux extrémités s'avère être une méthode très efficace. Cependant, pour des poutres ayant un rapport a_v/h élevé (supérieur à 6), ce type d'ancrage a peu d'impact sur la résistance ultime de la poutre. Enfin, le mode de rupture des poutres renforcées dépend de la valeur du rapport a_v/h :

$a_v / h = 3,0$ un décollement, qui provient de fissures d'effort tranchant, se produit aux extrémités du tissu.

$a_v / h = 3,4$ rupture par cisaillement à l'interface des poutres et du tissu, due aux fissures d'effort tranchant;

$a_v / h = 4,0 \sim 7,72$ rupture par cisaillement à l'interface des poutres et du tissu. Cette rupture provient de la combinaison du moment de flexion et de l'effort tranchant.

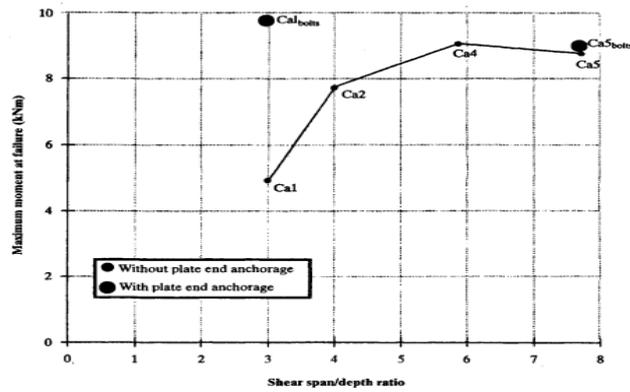


Figure III.7 :Moment ultime des poutres renforcées en fonction de la valeur av/h [54]

Dans le cas de nos poutres courtes ($av/h = 1,5$), sans ancrages aux extrémités et sans renforcement latéral, le mode de rupture probable sera un décollement du tissu induit par des fissures d'effort tranchant.[63]

III.2.3.2. Influence du taux de renforcement des armatures tendues

Le mode de rupture et le gain de résistance ultime apportés par le composite dans les poutres en béton armé renforcées dépendent du taux de renforcement des armatures tendues.

Nguyen [64] L'étude a porté sur des poutres de dimensions $120 \times 150 \times 1500 \text{ cm}^3$, avec des taux de renforcement respectifs de 0,39 % et 4,36 %. La poutre faiblement armée renforcée (CFRP) a connu une rupture due à une fissure d'effort tranchant près de l'extrémité du tissu. En revanche, la poutre fortement armée a subi une rupture de l'enrobage vers la mi-portée de la poutre.

Rahimi [55] a effectué une étude similaire sur des poutres $200 \times 150 \times 2300 \text{ cm}^3$ renforcées par CFRP, dont le taux de renforcement des armatures est $r = 0,65\%$ et $1,68\%$ (Figure III.8).

On observe que l'augmentation de la résistance ultime des poutres où le taux de renforcement est de 1,68 % (poutre type C, suffisamment armée à l'effort tranchant) est nettement plus limitée par rapport à celles où le taux de renforcement est de 0,65 % (poutre type A, faiblement armée à l'effort tranchant ; poutre type B, suffisamment armée à l'effort tranchant). Les ruptures des poutres de type C résultent de la rupture du béton comprimé associée au décollement du tissu.

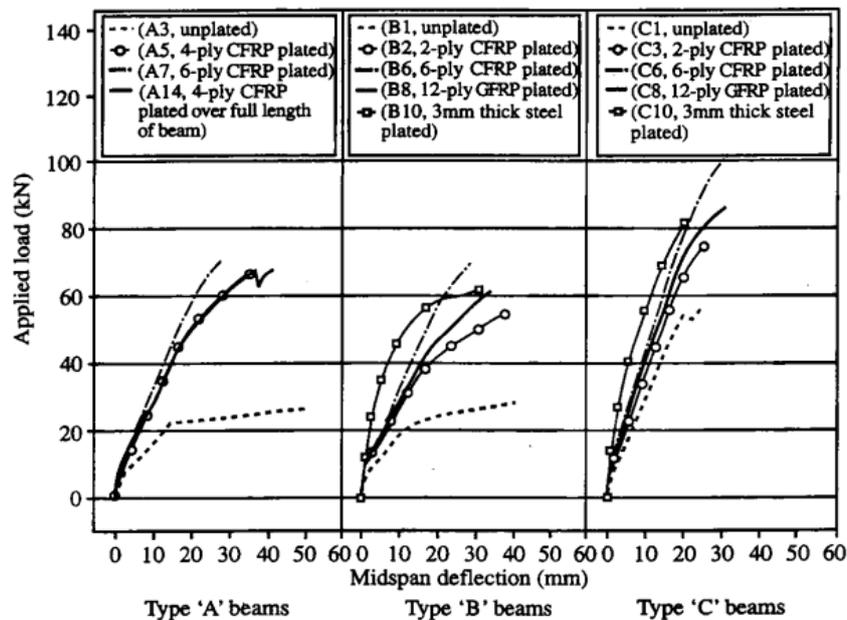


Figure III.8 : Influence du taux de renforcement des armatures [55]

Ainsi, dans le cas d'une poutre renforcée fortement armée en partie tendue et suffisamment armée à l'effort tranchant, la rupture est provoquée par la ruine du béton comprimé et la résistance des armatures est loin d'être atteinte.

Il s'agit d'une rupture brutale et prématurée. Pour les poutres faiblement ou moyennement armées, le renforcement par composite est efficace en termes de résistance ultime, d'où leur domaine d'application. Néanmoins, dans le cas d'une poutre sans armature tendue et renforcée par un tissu de verre (GFRP), la charge ultime mesurée est très inférieure à la valeur de calcul :

la rupture prématurée de cette poutre est causée par des fissures très ouvertes dues au moment fléchissant, le tissu se décollant dans les zones fissurées. Ainsi, une quantité minimale d'armatures est nécessaire pour limiter la largeur des fissures de flexion et, par conséquent, éviter la rupture prématurée due au décollement du tissu. [56]

III.2.3.3. Influence de la longueur de la plaque composite

La répartition des contraintes en traction dans le FRP le long de la longueur du tissu est représentée schématiquement sur la Figure III.5. Elle augmente de zéro aux extrémités du tissu jusqu'à une valeur constante au milieu de la poutre.

Dans certains cas, la différence de longueur de tissu peut entraîner des modes de rupture différents. Afin d'étudier l'influence de la longueur de tissu, Fanning [57] a réalisé des essais en flexion quatre points sur des poutres renforcées du tissu de CFRP en utilisant

différentes longueurs de tissu et en faisant varier le rapport de la longueur du tissu par rapport à la distance entre la charge et l'appui (a_l/a_v , cf. Figure III.6).

Les poutres ayant un rapport $a_l/a_v = 1$ (les extrémités du tissu au niveau des appuis) ont subi des ruptures causées par des fissures d'effort tranchant, situées au niveau du point de chargement, entraînant une rupture de l'enrobage.

En revanche, les poutres renforcées ayant un rapport a_l/a_v plus petit (0,5, 0,58, 0,65) ont subi une rupture de l'enrobage près des extrémités du tissu. L'influence de la longueur de tissu sur la résistance ultime a également été étudiée par Nguyen [64] et Quantrill [58] sur des poutres ayant une valeur a_l/a_v relativement petite (environ 3). Pour les poutres renforcées avec un tissu où $a_l/a_v > 1$, les appuis agissent comme des ancrages aux extrémités du tissu, ce qui empêche le décollement et augmente considérablement la résistance ultime des éléments.

Les études réalisées sur des poutres réelles de 18 mètres de longueur dans le projet ROBUST [54] montrent que, quelle que soit la longueur de tissu, la rupture des poutres renforcées provient du décollement local de tissu.

Les résultats expérimentaux des études précédentes sur les poutres renforcées de tissu de carbone sont synthétisés dans le Tableau III.1 . Dans ce tableau, on constate que :

- pour $a_v/h < 3$ (poutres courtes), la longueur du renforcement inférieur ($a_l/a_v < 1$) n'a que peu d'influence sur la valeur de résistance ultime ;
- pour $a_v/h = 4,58$, la longueur du tissu influe sur la résistance de la poutre renforcée ;
- pour $a_v/h = 10,6$ (poutres longues), la longueur du renforcement ($a_l/a_v < 1$) influe peu sur la valeur de résistance ultime ;
- les ancrages du tissu ($a_l/a_v > 1$) conduisent dans tous les cas aux charges de ruptures les plus élevées

Tableau III.1 : Influence de la longueur du renforcement sur la résistance ultime et le mode de rupture (r : taux de renforcement des armatures tendues) [54]

Etude	portée de la poutre (cm)	Acier tendus	a_v/h	a_t/a_v	Charge ultime (kN)	Modes de rupture
Fanning et al., 2001	280	3R12 $\rho=1,04\%$	4,58	1	115	Rupture d'enrobage et décollement du tissu
				0,65	102	tissu et l'enrobage séparés à l'extrémité de tissu
				0,58	81	
				0,5	72	
Nguyen et al., 2001	133	3R10 $\rho=1,64\%$	2,93	>1	118	ruine du béton comprimé
				0,8	58,9	tissu et l'enrobage séparés aux extrémités du tissu
				0,74	57,3	
				0,57	56,2	
Quantrill et al., 1996	90	3R6 $\rho=1,2\%$	3	0,93	40,8	tissu et l'enrobage séparés à l'extrémité de tissu
				>1	63,5	ruine du béton comprimé
Hollaway Et Lemming (2001)	1800	précontraint	10,6	0,85	72	décollement local du tissu
				0,63	77	
				0,2	60	

III.2.3.4. Influence de la quantité du composite

La résistance ultime des poutres renforcées augmente avec la quantité de renforcement composite, mais cette augmentation n'est pas nécessairement linéaire en raison des divers modes de rupture potentiels mentionnés précédemment. L'impact de la quantité de tissu longitudinal sur la résistance ultime des poutres renforcées a été examiné par plusieurs auteurs. Grace [59] a employé différentes quantités de tissu de carbone en renforçant les zones de moment négatif de poutres faiblement ou fortement armées à l'effort tranchant (taux de renforcement à l'effort tranchant égal à 0,13% et 0,38%). Dans les études de Rahimi [57] le tissu de carbone de différentes épaisseurs a été appliqué au renforcement de poutres faiblement ou normalement armées à l'effort tranchant (taux de renforcement à l'effort tranchant égal à 0,19% et 0,38%). Les résultats de ces études sont synthétisés dans le Tableau

Tableau III.2 : Influence de la quantité de tissu sur la résistance ultime [57]

Auteur	section de tissu (mm ²)	ρ	charge ultime (kN)	Modes de rupture
poutres faiblement armées à l'effort tranchant (cadres : 0,13~0,19%)				
Grace (2001)	60	1,4%	163	décollement du tissu dû aux fissures d'effort tranchant
	120	1,4%	156	
Rahimi (2001)	120	0,65%	63	séparation d'enrobage et décollement de tissu provenant de l'effort tranchant
	180	0,65%	65	
poutres fortement armées à l'effort tranchant (cadres : 0,38%)				
Grace (2001)	120	1,4%	163	décollement du tissu dû à la combinaison de l'effort tranchant et du moment fléchissant
	180	1,4%	178	
Rahimi (2001)	60	0,65%	54	séparation d'enrobage et décollement du tissu
	180	0,65%	70	
	60	1,68%	76	ruine du béton comprimé et décollement du tissu
	180	1,68%	102	

III.3. Conclusion

Renforcer ou réparer des structures en béton armé en utilisant des plaques de matériaux composites sur les surfaces tendues ou les surfaces latérales est une méthode extrêmement efficace.

En renforçant les poutres avec des matériaux composites sur les surfaces tendues, la résistance mécanique est nettement améliorée grâce à la réduction de la propagation des fissures. Ceci est particulièrement bénéfique lorsque la partie tendue de la poutre n'est pas suffisamment armée.

Ce chapitre aborde le comportement des poutres en béton armé soumises à des charges statiques, ainsi que les divers modes et mécanismes de rupture des poutres renforcées par des composites dans les mêmes conditions. De plus, il examine les facteurs qui influent sur le comportement de ces poutres renforcées.

Chapitre IV

*Analyse thermomécanique
des contraintes d'interface
d'une poutre console
en béton armée
endommagée et réparer par
matériaux composites.*

IV.1. Introduction

Le renforcement des poutres en béton avec des plaques de composite FRP constitue une innovation récente dans le domaine du génie civil. Toutefois, le mode de rupture le plus crucial de ces structures renforcées est le décollement de la plaque composite, attribuable aux contraintes d'interfaces élevées près du bord de la plaque. Au cours des dernières années, plusieurs travaux de recherche ont été réalisés sur cette méthode de réhabilitation.

Cette étude vise à examiner en détail les aspects thermomécaniques des contraintes d'interface dans les poutres consoles réparées par des composites. Nous nous concentrerons sur l'analyse des interactions entre les différents matériaux, en tenant compte des variations de température et des charges mécaniques auxquelles la poutre est soumise.

En comprenant mieux ces mécanismes, nous pourrions développer des méthodes de conception et de réparation plus efficaces pour les structures endommagées, garantissant ainsi leur intégrité structurelle à long terme.

IV.2. Analyse théorique

Un élément infinitésimal de la poutre renforcée est illustré à la figure (IV.1) où les contraintes de cisaillement et les contraintes normales d'interface sont notées respectivement $\tau(x)$ et $\sigma(x)$. Le système est composé de trois matériaux : la poutre en béton, la couche d'adhésif et la plaque en composite.

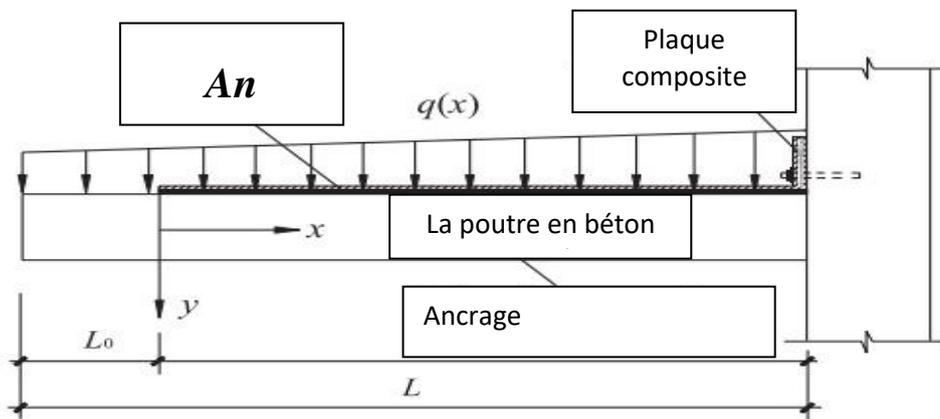


Figure IV.1 : Poutre console renforcée par des plaques en matériaux composites.

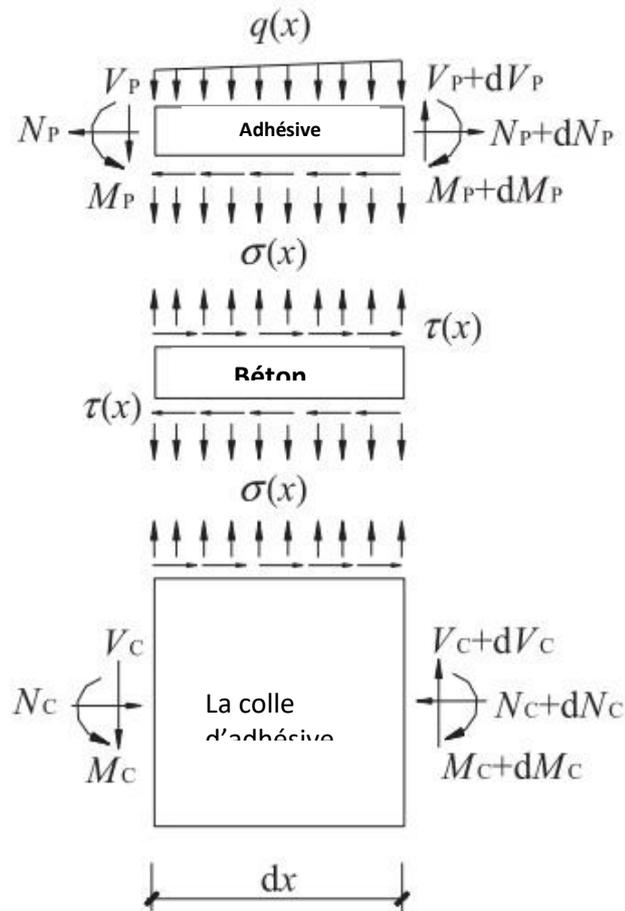


Figure IV.2 : Un segment différentiel de la poutre en béton renforcée par composite.

Les propriétés des matériaux endommagés

Propose un modèle d'endommagement isotrope dans lequel la configuration d'énergie élastique de déformation pour une plaque endommagée est équivalente à la configuration d'énergie élastique de déformation pour une plaque non endommagée. Sur la base de cette hypothèse, les relations de constantes élastiques d'état endommagé et d'état non endommagé peut être exprimé comme :

$$\bar{E} = E(1 - d) \quad \text{et} \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

\bar{E} : Les modules d'élasticité endommagés à calculer ;

E : Le module d'élasticité non endommagé du béton ;

d : Le variable d'endommagée varie entre 0 et 1.

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

➤ **Equations d'élasticité**

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

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \quad (IV.2)$$

En se basant sur la théorie des plaques stratifiés, la déformation $\varepsilon_1(x)$ de la plaque composite au voisinage de la couche d'adhésive est donnée par :

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

Où $u_1(x)$ et $u_2(x)$ sont les déplacements horizontaux de la poutre en béton et la plaque composite respectivement. $M_1(x)$ et $M_2(x)$ sont respectivement les moments de flexion appliqués à la poutre en béton et la plaque composite ; E_1 est le module de Young du béton ; I_1 le moment d'inertie, e est la distance entre l'axe neutre à la fibre inférieure du béton, N_1 et N_2 sont les forces axiales appliquées au béton et à la plaque composite respectivement, b_2 et t_2 sont la largeur et l'épaisseur de la plaque de renforcement.

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

$$\text{Dans la direction x: } \frac{dN_1(x)}{dx} = -b_2 \tau(x) \quad (IV.4)$$

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

$$\text{Dans la direction y: } \frac{dV_1}{dx} = -[\sigma_n(x)b_2 + qb_1] \quad (IV.5)$$

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

$$\text{Le moment d'équilibre : } \frac{dM_1}{dx} = V_1(x) - \tau(x)b_2.y_1 \quad (\text{IV.6})$$

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

$$\text{Dans la direction x : } \frac{dN_2(x)}{dx} = b_2\tau(x) \quad (\text{IV.7})$$

$$\text{Dans la direction y : } \frac{dV_1}{dx} = \sigma_n(x)b_2 \quad (\text{IV.8})$$

$$\text{Le moment d'équilibre : } \frac{dM_2}{dx} = V_2(x) - \tau(x)b_2.y_2 \quad (\text{IV.9})$$

Où $V_1(x)$ est l'effort tranchant de la plaque de renforcement.

IV.4.1. La distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite – Béton

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

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

$$\tau(x) = K_s \Delta u(x) = K_s [u_2(x) - u_1(x)] \quad (\text{IV.10})$$

Où K_s est la rigidité au cisaillement de la couche d'adhésive par unité de longueur. A partir de l'équation (IV.10) on peut en déduire l'expression de K_s qui est donnée par :

$$K_s = \frac{\tau(x)}{\Delta u(x)} = \frac{\tau(x)}{\Delta u(x)/t_a} \frac{1}{t_a} = \frac{G_a}{t_a} \quad (\text{IV.11})$$

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

En différentiant les équations (IV.10), (IV.2) et (IV.3) par rapport à x, et en négligeant le moment de flexion de la plaque composite nous aurons :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \left[\left(\frac{y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{N_2}{E_2 A_2} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d\tau_a}{dx} \right) - \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \right) \right] \quad (IV.12)$$

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

$$M_1(x) = R M_2(x) \quad (IV.13)$$

Avec :

$$R = \frac{E_1 I_1}{E_2 I_2} \quad (IV.14)$$

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

$$M_T(x) = M_1(x) + M_2(x) + N(x)(y_1 + y_2 + t_a) \quad (IV.15)$$

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

$$N(x) = N_1(x) = N_2(x) = b_2 \int_0^x \tau(x) dx \quad (IV.16)$$

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

$$M_1(x) = \frac{R}{R+1} \left[M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx \right] \quad (IV.17)$$

$$M_2(x) = \frac{1}{R+1} \left[M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx \right] \quad (IV.18)$$

En dérivant les expressions (IV.17) et (IV.18) nous aurons :

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = \frac{R}{R+1} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (IV.19)$$

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = \frac{R}{R+1} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (IV.20)$$

En différentiant l'équation (IV.12) nous aurons:

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} = K_s \left[\frac{y_2}{E_2 I_2} \frac{dM_2(x)}{dx} + \frac{1}{E_2 A_2} \frac{dN_2(x)}{dx} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d^2\tau_a}{dx^2} - \frac{y_1}{E_1 I_1} \frac{dM_1(x)}{dx} + \frac{1}{E_1 A_1} \frac{dN_1(x)}{dx} - \frac{t_1}{3G_1} \frac{d^2\tau_a}{dx^2} \right] \quad (IV.22)$$

La substitution de l'effort tranchant (équations (V.19) et (V.20)) et l'effort normal (équations (V.16)) dans l'équation (V.20) nous permet d'obtenir l'équation différentielle des contraintes d'interface de cisaillement :

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} - K_1 b_2 \left(\frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right) \tau(x) + K_1 \left(\frac{(y_1 + y_2)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) V_T(x) = 0 \quad (IV.22)$$

Avec :

$$K_1 = \frac{1}{\left(\frac{t_a}{G_a} + \frac{t_1}{3G_1} + \frac{t_2}{3G_2} \right)} \quad (IV.23)$$

La solution de l'équation différentielle (équation (IV.22)) ci-dessus est donné par :

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 V_T(x) \quad (IV.24)$$

Avec :

$$\lambda^2 = K_1 b_2 \left(\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} + \frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (IV.25)$$

$$m_1 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left(\frac{(y_1 + y_2)}{E_1 I_1 + E_2 I_1} \right) \quad (IV.26)$$

Pour notre cas d'une charge uniformément répartie, la formule de la contrainte de cisaillement est donnée par l'équation suivante :

$$\tau(x) = \left(\frac{q}{2\lambda} \cdot e^{-\lambda x} \right) (2 \cdot m_1 + m_2 \cdot a^2) + m_1 \cdot q \cdot (a + x) \quad (IV.27)$$

$$m_2 = \frac{K_1 y_1}{E_1 I_1} (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta t \quad (IV.28)$$

Pour le cas d'une charge concentré. La formule de la contrainte de cisaillement est donnée par l'équation suivante :

$$\tau(x) = B_5 \cosh(\lambda x) + B_6 \sinh(\lambda x) + m_1 V_t(0) \quad (V.29)$$

Avec :

$$B_6 = \frac{-m_2}{\lambda} \quad (V.30)$$

$$B_5 = - \left(B_6 + \frac{m_1 V_t(0)}{\cosh(\lambda L)} \right) \quad (V.31)$$

IV.5.2. La distribution des contraintes normales dans l'interface composite – béton

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

$$\sigma_n(x) = K_n \Delta w(x) = K_n [w_2(x) - w_1(x)] \quad (\text{IV.32})$$

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

$$K_n = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)} = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)/t_a} \left(\frac{1}{t_a} \right) = \frac{E_a}{t_a} \quad (\text{IV.33})$$

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

En dérivant l'équation (IV.29) deux fois il en résulte :

$$\frac{d^2 \sigma_n(x)}{dx^2} = K_n \left[\frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} - \frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} \right] \quad (\text{IV.34})$$

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

$$\frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} = -\frac{M_1(x)}{E_1 I_1}, \quad \frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} = -\frac{M_2(x)}{E_2 I_2} \quad (\text{IV.35})$$

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

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

$$\text{Adhérent 1 :} \quad \frac{d^4 w_1(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_1 I_1} b_2 \sigma_n(x) + \frac{y_1}{E_1 I_1} b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_1 I_1} \quad (\text{IV.36})$$

$$\text{Adhérent 2 :} \quad \frac{d^4 w_2(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_2 I_2} b_2 \sigma_n(x) + \frac{y_2}{E_2 I_2} b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (\text{IV.37})$$

La substitution des équations (IV.33) et (IV.34) dans la quatrième dérivée de la contrainte normale obtenue à partir de l'équation (IV.29) donne l'équation différentielle régissant la contrainte normale d'interface :

$$\frac{d^4 \sigma_n(x)}{dx^4} + K_n \left(\frac{b_2}{E_1 I_1} + \frac{b_2}{E_2 I_2} \right) \sigma_n(x) - K_n \left(\frac{b_2 y_1}{E_1 I_1} - \frac{b_2 y_2}{E_2 I_2} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q K_n}{E_1 I_1} = 0 \quad (IV.38)$$

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

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (IV.39)$$

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

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (IV.40)$$

Ou :

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_n}{4} \left(\frac{b_2}{E_1 I_1} + \frac{b_2}{E_2 I_2} \right)} \quad (IV.41)$$

$$n_1 = \left(\frac{E_2 I_2 y_1 - E_1 I_1 y_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (IV.42)$$

$$n_2 = \frac{E_2 I_2}{b_2 (E_1 I_1 + E_2 I_2)} \quad (IV.43)$$

Les constantes d'intégration C1 et C2 sont données par :

$$C_1 = \frac{K_n}{2\beta^3 E_1 I_1} [V_T(0) + \beta M_T(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left(\frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \quad (IV.44)$$

$$C_2 = -\frac{K_n}{2\beta^2 E_1 I_1} M_T(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad (IV.45)$$

Ou :

$$n_3 = b_2 K_n \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \right) \quad (IV.46)$$

IV.6. Validation du modèle

Pour cela, une poutre console en béton armé endommagée réparée par matériaux composites est analysée. La poutre, ayant une travée de 1500 mm, soumise à une charge uniformément répartie d'une valeur de 30 KN/m. et une charge concentrée d'une valeur de 22.5 KN. La distance entre l'extrémité du poutre et le bord de la plaque de renforcement (L_0) est de 500 mm.

Les caractéristiques physiques et les propriétés mécaniques des matériaux utilisés sont rapportées au tableau (IV.1).

Tableau IV.1 : Propriétés géométriques et mécaniques des matériaux.

Matériaux	Largeur	Hauteur	Module de Young
Poutre en béton	$b_1 = 200$ mm	$t_1 = 300$ mm	$E_1 = 30\ 000$ MPa
Adhésif	$b_a = 200$ mm	$t_a = 2$ mm	$E_a = 3\ 000$ MPa
CFRP	$b_2 = 200$ mm	$t_2 = 4$ mm	$E_2 = 140\ 000$ MPa

IV.7.1. Validation du modèle

La présente méthode a été validée en comparant les résultats des contraintes d'interface avec ceux obtenus à partir de la méthode de RABAHI [65]

➤ Charge répartie

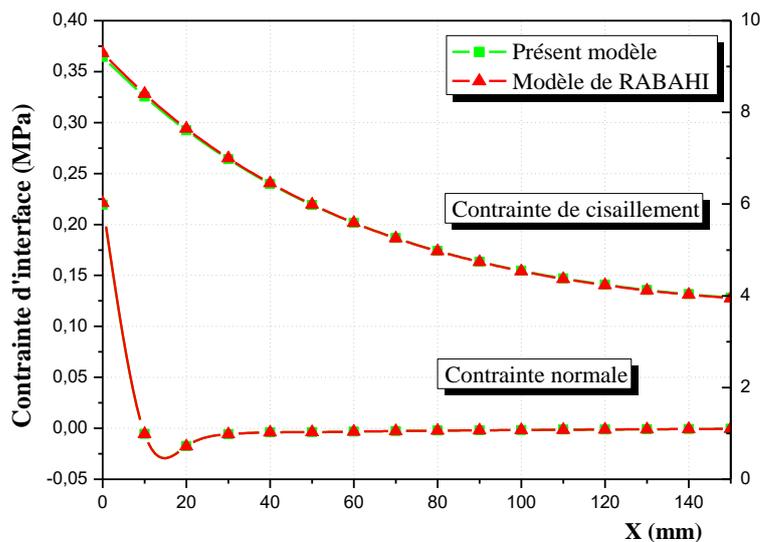


Figure IV.3: Validation de la présente méthode en comparant avec la méthode de RABAHI [65] (Charge répartie)

Charge concentrée

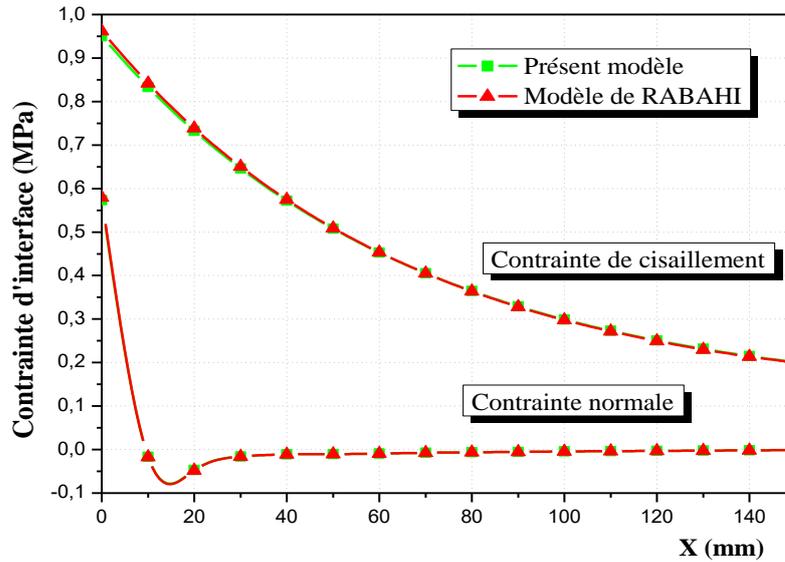


Figure IV.4: Validation de la présente méthode en comparant avec la méthode de RABAHI [65]

(Charge concentrée)

IV.8. L'étude paramétrique

IV.8.1. Effet de la températures (DT)

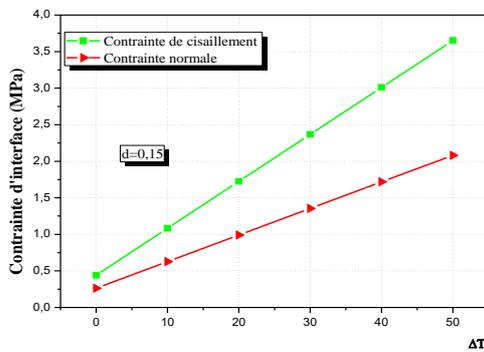
L'effet la température (DT) sur les contraintes d'interface maximales d'une poutre console en béton armée endommagée ($d = 0.15$) réparer par composite stratifiée est illustré à la figure (IV.5) et tableau (IV.2)

On observe que lorsque la température augmente, les contraintes d'interface maximales augmentent significativement.

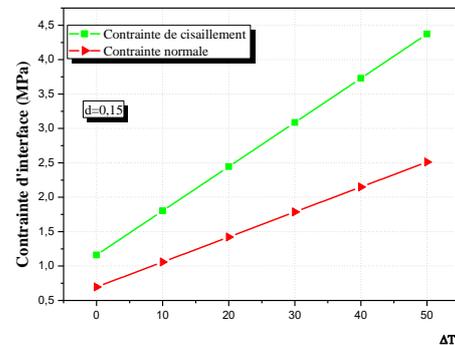
Tableau . IV.2 L'influence de la température (DT) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée

D	charge repartie											
	DT = 0		DT = 10		DT = 20		DT = 30		DT = 40		DT = 50	
	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN
0,05	0,4131	0,2463	1,0926	0,6301	1,7721	1,0139	2,4516	1,3977	3,1310	1,7815	3,8105	2,1653
0,1	0,4260	0,2545	1,0874	0,6284	1,7488	1,0023	2,4102	1,3762	3,0716	1,7501	2,1653	2,1240
0,15	0,4399	0,2632	1,0823	0,6267	1,7248	0,9903	2,3673	1,3538	3,0098	1,7173	3,6522	2,0808

0,2	0,4548	0,2727	1,0774	0,6253	1,7000	0,9779	2,3226	1,3305	2,9452	1,6831	3,5678	2,0357
0,25	0,4709	0,2830	1,0727	0,6241	1,6744	0,9651	2,2761	1,3062	2,8778	1,6473	3,4795	1,9884
0,3	0,4885	0,2942	1,0682	0,6231	1,6479	0,9521	2,2276	1,2810	2,8073	1,6099	3,3870	1,9388
Charge concentrée												
	DT = 0		DT = 10		DT = 20		DT = 30		DT = 40		DT = 50	
D	CS	CN										
0	1,0639	0,6339	1,7606	1,0270	2,4574	1,4204	3,1541	1,8136	3,8509	2,2069	4,5476	2,6001
0,05	1,0938	0,6528	1,7733	1,0366	2,4528	1,4204	3,1322	1,8042	3,8117	2,1881	4,4912	2,5719
0,1	1,1258	0,6733	1,7873	1,0474	2,4487	1,4212	3,1101	1,7952	3,7716	2,1693	4,4330	2,5431
0,15	1,1599	0,6952	1,8023	1,0587	2,4448	1,4222	3,0873	1,7858	3,7298	2,1493	4,3722	2,5127
0,2	1,1966	0,7188	1,8192	1,0714	2,4418	1,4241	3,0645	1,7767	3,6871	2,1293	4,3097	2,4819
0,25	1,2361	0,7444	1,8378	1,0856	2,4395	1,4267	3,0412	1,7678	3,6429	2,1087	4,2447	2,4499
0,3	1,2787	0,7722	1,8584	1,1012	2,4382	1,4301	3,0179	1,7591	3,5976	2,0880	4,1773	2,4169



(a)



(b)

Figure IV.5: L'influence de la température (DT) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée ($d = 0.15$) et renforcée par matériaux composites: (a) charge répartie, (b) charge concentrée à l'extrémité

IV.8.2. Effet de la longueur non renforcée (a)

L'effet de la longueur (a) sur les contraintes d'interface maximales d'une poutre console en béton armée endommagée ($d = 0.15$) réparée par composite stratifiée sous un température de ($DT=30$) est illustré à la figure (IV.6) et tableau (IV.3) pour une orientation des fibres est égal à zéro pour toutes les couches.

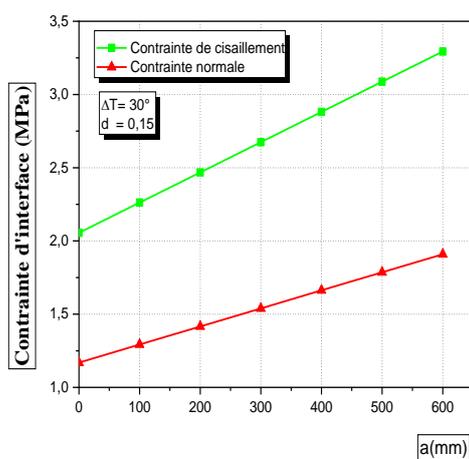
On constate qu'à mesure que la longueur « a » augmente, les contraintes d'interface maximales augmentent significativement.

Tableau . IV.3 : L'influence de la longueur (a) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée et renforcée par matériaux composites .

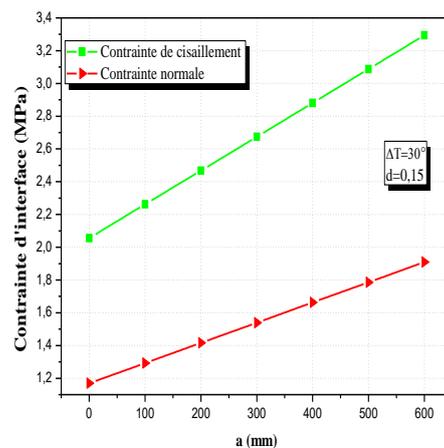
a	D	charge répartie											
		DT = 0		DT = 10		DT = 20		DT = 30		DT = 40		DT = 50	
		CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN
0	0	0,0088	0,0053	0,7056	0,3985	1,4023	0,7918	2,0991	1,1850	2,7958	1,5782	3,4926	1,9715
	0,05	0,0093	0,0056	0,6888	0,3894	1,3683	0,7732	2,0477	1,1570	2,7272	1,5408	3,4067	1,9246
	0,1	0,0099	0,0059	0,6713	0,3798	1,3327	0,7537	1,9941	1,1276	2,6555	1,5015	3,3169	1,8754
	0,15	0,0105	0,0063	0,6530	0,3698	1,2954	0,7333	1,9379	1,0968	2,5804	1,4603	3,2229	1,8239
	0,2	0,0112	0,0067	0,6338	0,3593	1,2564	0,7119	1,8790	1,0645	2,5016	1,4171	3,1242	1,7696
	0,25	0,0119	0,0071	0,6137	0,3482	1,2154	0,6893	1,8171	1,0304	2,4188	1,3715	3,0205	1,7125
	0,3	0,0128	0,0077	0,5925	0,3366	1,1722	0,6655	1,7519	0,9944	2,3316	1,3233	2,9113	1,6522
100	0	0,0366	0,0219	0,7333	0,4151	1,4301	0,8083	2,1268	1,2016	2,8236	1,5948	3,5203	1,9881
	0,05	0,0380	0,0228	0,7175	0,4066	1,3970	0,7904	2,0764	1,1742	2,7559	1,5579	3,4354	1,9417
	0,1	0,0396	0,0237	0,7010	0,3976	1,3624	0,7715	2,0238	1,1454	2,6852	1,5193	3,3466	1,8932
	0,15	0,0413	0,0248	0,6838	0,3883	1,3263	0,7518	1,9688	1,1153	2,6112	1,4788	3,2537	1,8424
	0,2	0,0432	0,0259	0,6658	0,3785	1,2885	0,7311	1,9111	1,0837	2,5337	1,4363	3,1563	1,7889
	0,25	0,0453	0,0272	0,6471	0,3683	1,2488	0,7094	1,8505	1,0505	2,4522	1,3915	3,0539	1,7326
	0,3	0,0477	0,0286	0,6274	0,3576	1,2071	0,6865	1,7868	1,0154	2,3665	1,3443	2,9462	1,6732
200	0	0,0897	0,0535	0,7864	0,4467	1,4832	0,8400	2,1799	1,2332	2,8767	1,6265	3,5734	2,0197
	0,05	0,0927	0,0554	0,7722	0,4392	1,4517	0,8230	2,1312	1,2068	2,8106	1,5906	3,4901	1,9744
	0,1	0,0961	0,0575	0,7575	0,4314	1,4189	0,8053	2,0803	1,1792	2,7417	1,5531	3,4031	1,9270
	0,15	0,0997	0,0597	0,7422	0,4232	1,3846	0,7868	2,0271	1,1503	2,6696	1,5138	3,3121	1,8773
	0,2	0,1036	0,0622	0,7262	0,4148	1,3489	0,7674	1,9715	1,1199	2,5941	1,4725	3,2167	1,8251
	0,25	0,1079	0,0648	0,7097	0,4059	1,3114	0,7470	1,9131	1,0881	2,5148	1,4292	3,1165	1,7702
	0,3	0,1126	0,0678	0,6924	0,3967	1,2721	0,7256	1,8518	1,0545	2,4315	1,3835	3,0112	1,7124
300	0	0,1681	0,1002	0,8649	0,4934	1,5616	0,8867	2,2584	1,2799	2,9551	1,6732	3,6519	2,0664
	0,05	0,1735	0,1036	0,8530	0,4874	1,5325	0,8712	2,2119	1,2550	2,8914	1,6388	3,5709	2,0226
	0,1	0,1793	0,1072	0,8407	0,4811	1,5021	0,8550	2,1635	1,2289	2,8249	1,6028	3,4863	1,9767
	0,15	0,1856	0,1111	0,8280	0,4746	1,4705	0,8382	2,1130	1,2017	2,7555	1,5652	3,3980	1,9287
	0,2	0,1924	0,1154	0,8150	0,4680	1,4376	0,8206	2,0602	1,1732	2,6828	1,5257	3,3054	1,8783
	0,25	0,1997	0,1200	0,8015	0,4611	1,4032	0,8022	2,0049	1,1433	2,6066	1,4843	3,2083	1,8254
	0,3	0,2078	0,1251	0,7875	0,4540	1,3672	0,7829	1,9469	1,1119	2,5266	1,4408	3,1063	1,7697
400	0	0,2719	0,1620	0,9687	0,5552	1,6654	0,9484	2,3622	1,3417	3,0589	1,7349	3,7557	2,1282
	0,05	0,2803	0,1672	0,9598	0,5510	1,6393	0,9348	2,3187	1,3186	2,9982	1,7024	3,6777	2,0862
	0,1	0,2893	0,1729	0,9507	0,5468	1,6121	0,9207	2,2735	1,2946	2,9349	1,6685	3,5963	2,0424
	0,15	0,2990	0,1789	0,9414	0,5425	1,5839	0,9060	2,2264	1,2695	2,8689	1,6330	3,5113	1,9965
	0,2	0,3094	0,1855	0,9320	0,5381	1,5546	0,8907	2,1772	1,2433	2,7998	1,5959	3,4225	1,9485
	0,25	0,3207	0,1927	0,9225	0,5338	1,5242	0,8749	2,1259	1,2160	2,7276	1,5570	3,3293	1,8981
	0,3	0,3331	0,2006	0,9128	0,5295	1,4925	0,8584	2,0722	1,1873	2,6519	1,5163	3,2316	1,8452
500	0	0,4011	0,2388	1,0979	0,6320	1,7946	1,0253	2,4914	1,4185	3,1881	1,8117	3,8849	2,2050
	0,05	0,4131	0,2463	1,0926	0,6301	1,7721	1,0139	2,4516	1,3977	3,1310	1,7815	3,8105	2,1653
	0,1	0,4260	0,2545	1,0874	0,6284	1,7488	1,0023	2,4102	1,3762	3,0716	1,7501	3,7353	2,1240
	0,15	0,4399	0,2632	1,0823	0,6267	1,7248	0,9903	2,3673	1,3538	3,0098	1,7173	3,6522	2,0808
	0,2	0,4548	0,2727	1,0774	0,6253	1,7000	0,9779	2,3226	1,3305	2,9452	1,6831	3,5678	2,0357
	0,25	0,4709	0,2830	1,0727	0,6241	1,6744	0,9651	2,2761	1,3062	2,8778	1,6473	3,4795	1,9884
	0,3	0,4885	0,2942	1,0682	0,6231	1,6479	0,9521	2,2276	1,2810	2,8073	1,6099	3,3870	1,9388
600	0	0,5556	0,3306	1,2524	0,7239	1,9491	1,1171	2,6459	1,5104	3,3427	1,9036	4,0394	2,2969
	0,05	0,5720	0,3410	1,2515	0,7248	1,9309	1,1086	2,6104	1,4923	3,2899	1,8761	3,9694	2,2599
	0,1	0,5895	0,3520	1,2509	0,7259	1,9123	1,0998	2,5737	1,4737	3,2351	1,8476	3,8965	2,2215
	0,15	0,6083	0,3639	1,2507	0,7274	1,8932	1,0910	2,5357	1,4545	3,1782	1,8180	3,8206	2,1815
	0,2	0,6285	0,3768	1,2511	0,7294	1,8737	1,0820	2,4963	1,4346	3,1189	1,7872	3,7415	2,1398
	0,25	0,6503	0,3908	1,2521	0,7319	1,8538	1,0730	2,4555	1,4140	3,0572	1,7551	3,6589	2,0962

		0,3	0,6740	0,4060	1,2538	0,7350	1,8335	1,0639	2,4132	1,3928	2,9929	1,7217	3,5726	2,0506
		Charge cocentree												
		DT = 0		DT = 10		DT = 20		DT = 30		DT = 40		DT = 50		
a	D	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	
0	0	0,1129	0,0692	0,8096	0,4624	1,5064	0,8557	2,2031	1,2489	2,8999	1,6422	3,5966	2,0355	
	0,05	0,1176	0,0721	0,7971	0,4559	1,4765	0,8397	2,1560	1,2236	2,8355	1,6073	3,5149	1,9911	
	0,1	0,1227	0,0752	0,7841	0,4491	1,4455	0,8231	2,1070	1,1971	2,7684	1,5711	3,4298	1,9449	
	0,15	0,1282	0,0786	0,7707	0,4422	1,4132	0,8057	2,0556	1,1692	2,6981	1,5328	3,3406	1,8963	
	0,2	0,1343	0,0824	0,7569	0,4350	1,3796	0,7876	2,0022	1,1403	2,6248	1,4929	3,2475	1,8455	
	0,25	0,1410	0,0865	0,7427	0,4275	1,3444	0,7687	1,9461	1,1097	2,5479	1,4509	3,1496	1,7921	
	0,3	0,1483	0,0910	0,7281	0,4200	1,3078	0,7489	1,8875	1,0778	2,4672	1,4067	3,0469	1,7357	
100	0	0,3031	0,1821	0,9999	0,5754	1,6966	0,9687	2,3933	1,3618	3,0901	1,7552	3,7868	2,1484	
	0,05	0,3128	0,1882	0,9923	0,5720	1,6718	0,9559	2,3512	1,3396	3,0307	1,7234	3,7102	2,1073	
	0,1	0,3233	0,1948	0,9847	0,5688	1,6462	0,9427	2,3077	1,3167	2,9691	1,6906	3,6305	2,0646	
	0,15	0,3346	0,2019	0,9770	0,5655	1,6195	0,9290	2,2619	1,2926	2,9044	1,6561	3,5469	2,0197	
	0,2	0,3468	0,2097	0,9694	0,5623	1,5920	0,9149	2,2146	1,2675	2,8373	1,6200	3,4599	1,9727	
	0,25	0,3600	0,2181	0,9617	0,5591	1,5634	0,9002	2,1651	1,2412	2,7668	1,5824	3,3686	1,9236	
	0,3	0,3744	0,2273	0,9541	0,5562	1,5338	0,8851	2,1135	1,2141	2,6933	1,5430	3,2730	1,8720	
200	0	0,4933	0,2950	1,1901	0,6883	1,8868	1,0815	2,5836	1,4748	3,2803	1,8680	3,9770	2,2613	
	0,05	0,5081	0,3044	1,1876	0,6882	1,8670	1,0719	2,5465	1,4558	3,2260	1,8396	3,9054	2,2233	
	0,1	0,5239	0,3144	1,1854	0,6884	1,8468	1,0624	2,5083	1,4363	3,1697	1,8102	3,8311	2,1843	
	0,15	0,5409	0,3252	1,1833	0,6887	1,8258	1,0524	2,4682	1,4159	3,1107	1,7794	3,7532	2,1430	
	0,2	0,5592	0,3370	1,1818	0,6895	1,8044	1,0422	2,4271	1,3949	3,0497	1,7475	3,6723	2,1001	
	0,25	0,5790	0,3496	1,1808	0,6908	1,7825	1,0320	2,3842	1,3729	2,9859	1,7140	3,5876	2,0551	
	0,3	0,6005	0,3635	1,1802	0,6925	1,7600	1,0214	2,3396	1,3503	2,9194	1,6793	3,4991	2,0082	
300	0	0,6835	0,4080	1,3803	0,8013	2,0770	1,1945	2,7738	1,5877	3,4705	1,9811	4,1673	2,3743	
	0,05	0,7033	0,4205	1,3828	0,8044	2,0623	1,1881	2,7417	1,5720	3,4212	1,9557	4,1007	2,3396	
	0,1	0,7245	0,4341	1,3860	0,8080	2,0474	1,1820	2,7088	1,5560	3,3703	1,9299	4,0317	2,3039	
	0,15	0,7472	0,4485	1,3897	0,8121	2,0322	1,1757	2,6747	1,5392	3,3171	1,9026	3,9596	2,2663	
	0,2	0,7717	0,4642	1,3943	0,8168	2,0169	1,1695	2,6396	1,5222	3,2622	1,8747	3,8848	2,2274	
	0,25	0,7980	0,4812	1,3997	0,8223	2,0015	1,1635	2,6032	1,5046	3,2049	1,8456	3,8066	2,1867	
	0,3	0,8265	0,4998	1,4062	0,8287	1,9860	1,1576	2,5657	1,4866	3,1455	1,8154	3,7252	2,1443	
400	0	0,8737	0,5209	1,5704	0,9141	2,2672	1,3074	2,9639	1,7006	3,6607	2,0940	4,3574	2,4871	
	0,05	0,8986	0,5367	1,5780	0,9205	2,2575	1,3043	2,9369	1,6881	3,6164	2,0720	4,2958	2,4557	
	0,1	0,9252	0,5537	1,5866	0,9276	2,2480	1,3016	2,9094	1,6755	3,5709	2,0494	4,2323	2,4234	
	0,15	0,9536	0,5719	1,5960	0,9354	2,2385	1,2990	2,8809	1,6625	3,5234	2,0260	4,1659	2,3895	
	0,2	0,9842	0,5915	1,6068	0,9442	2,2294	1,2968	2,8520	1,6494	3,4746	2,0020	4,0972	2,3547	
	0,25	1,0170	0,6128	1,6187	0,9539	2,2205	1,2950	2,8222	1,6361	3,4239	1,9771	4,0256	2,3182	
	0,3	1,0527	0,6360	1,6323	0,9649	2,2121	1,2938	2,7918	1,6228	3,3715	1,9518	3,9513	2,2807	
500	0	1,0639	0,6339	1,7606	1,0270	2,4574	1,4204	3,1541	1,8136	3,8509	2,2069	4,5476	2,6001	
	0,05	1,0938	0,6528	1,7733	1,0366	2,4528	1,4204	3,1322	1,8042	3,8117	2,1881	4,4912	2,5719	
	0,1	1,1258	0,6733	1,7873	1,0474	2,4487	1,4212	3,1101	1,7952	3,7716	2,1693	4,4330	2,5431	
	0,15	1,1599	0,6952	1,8023	1,0587	2,4448	1,4222	3,0873	1,7858	3,7298	2,1493	4,3722	2,5127	
	0,2	1,1966	0,7188	1,8192	1,0714	2,4418	1,4241	3,0645	1,7767	3,6871	2,1293	4,3097	2,4819	

	0,25	1,2361	0,7444	1,8378	1,0856	2,4395	1,4267	3,0412	1,7678	3,6429	2,1087	4,2447	2,4499
	0,3	1,2787	0,7722	1,8584	1,1012	2,4382	1,4301	3,0179	1,7591	3,5976	2,0880	4,1773	2,4169
600	0	1,2541	0,7468	1,9509	1,1400	2,6476	1,5332	3,3444	1,9265	4,0411	2,3198	4,7379	2,7130
	0,05	1,2891	0,7690	1,9686	1,1528	2,6481	1,5367	3,3275	1,9204	4,0069	2,3042	4,6864	2,6880
	0,1	1,3265	0,7930	1,9879	1,1669	2,6493	1,5409	3,3107	1,9148	3,9722	2,2888	4,6336	2,6627
	0,15	1,3662	0,8185	2,0087	1,1820	2,6512	1,5456	3,2936	1,9091	3,9361	2,2727	4,5786	2,6363
	0,2	1,4091	0,8461	2,0317	1,1988	2,6543	1,5514	3,2770	1,9040	3,8996	2,2567	4,5222	2,6093
	0,25	1,4551	0,8760	2,0568	1,2170	2,6585	1,5582	3,2602	1,8993	3,8619	2,2404	4,4636	2,5814
	0,3	1,5048	0,9085	2,0845	1,2375	2,6643	1,5664	3,2440	1,8953	3,8237	2,2242	4,4035	2,5532



(a)



(b)

Figure IV.6: L'influence de la longueur (a) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée (d = 0.15) et renforcée par matériaux composites sous une température de (DT=30): (a) charge répartie, (b) charge concentrée à l'extrémité

IV.8.3 Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive ta

L'effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive « ta » sur la variation des contraintes d'interface maximales d'une poutre console en béton armée endommagée (d = 0.15) réparé par composite stratifiée sous une température de (DT=30) est illustré à la figure (IV.7) et le tableau (IV.4).

Lorsque l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésive « ta » mène à une réduction significative des contraintes d'interface maximale.

Tableau IV.4: Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive ta sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée et renforcée par matériaux composites.

		CHARGE REPARTIE											
		DT = 0		DT = 10		DT = 20		DT = 30		DT = 40		DT = 50	
ta	D	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN
0,50	0,00	0,4328	0,3721	1,2006	0,9930	1,9684	1,6140	2,7362	2,2350	3,5041	2,8559	4,2719	3,4769
	0,05	0,4442	0,3827	1,1899	0,9862	1,9357	1,5898	2,6814	2,1934	3,4272	2,7970	4,1729	3,4006
	0,10	0,4564	0,3941	1,1794	0,9797	1,9023	1,5652	2,6252	2,1508	3,3481	2,7364	4,0710	3,3220
	0,15	0,4696	0,4064	1,1689	0,9733	1,8682	1,5402	2,5675	2,1071	3,2668	2,6741	3,9660	3,2410
	0,20	0,4838	0,4197	1,1586	0,9672	1,8334	1,5147	2,5081	2,0623	3,1829	2,6098	3,8577	3,1573
	0,25	0,4992	0,4342	1,1485	0,9615	1,7978	1,4889	2,4472	2,0162	3,0965	2,5435	3,7458	3,0709
	0,30	0,5159	0,4501	1,1387	0,9563	1,7615	1,4626	2,3844	1,9688	3,0072	2,4751	3,6301	2,9814
1,00	0,00	0,4212	0,3009	1,1630	0,8019	1,9048	1,3029	1,9048	1,3029	3,3884	2,3050	4,1302	2,8060
	0,05	0,4328	0,3098	1,1544	0,7976	1,8760	1,2854	1,8760	1,2854	3,3191	2,2609	4,0407	2,7487
	0,10	0,4454	0,3194	1,1459	0,7934	1,8465	1,2674	1,8465	1,2674	3,2477	2,2154	3,9482	2,6893
	0,15	0,4588	0,3298	1,1376	0,7894	1,8163	1,2490	1,8163	1,2490	3,1738	2,1682	3,8525	2,6279
	0,20	0,4733	0,3410	1,1293	0,7856	1,7853	1,2302	1,7853	1,2302	3,0973	2,1195	3,7533	2,5641
	0,25	0,4890	0,3532	1,1213	0,7821	1,7535	1,2110	1,7535	1,2110	3,0180	2,0689	3,6503	2,4978
	0,30	0,5061	0,3665	1,1135	0,7790	1,7209	1,1915	1,7209	1,1915	2,9358	2,0165	3,5432	2,4289
1,50	0,00	0,4107	0,2636	1,1289	0,7003	1,8471	1,1369	1,8471	1,1369	3,2836	2,0102	4,0018	2,4469
	0,05	0,4225	0,2717	1,1221	0,6974	1,8217	1,1231	1,8217	1,1231	3,2209	1,9744	3,9205	2,4001
	0,10	0,4353	0,2804	1,1154	0,6946	1,7956	1,1088	1,7956	1,1088	3,1559	1,9373	3,8360	2,3515
	0,15	0,4490	0,2898	1,1088	0,6920	1,7687	1,0942	1,7687	1,0942	3,0884	1,8987	3,7483	2,3009
	0,20	0,4637	0,2999	1,1024	0,6896	1,7410	1,0792	1,7410	1,0792	3,0183	1,8585	3,6570	2,2482
	0,25	0,4796	0,3110	1,0961	0,6874	1,7125	1,0639	1,7125	1,0639	2,9454	1,8167	3,5618	2,1932
	0,30	0,4970	0,3230	1,0901	0,6856	1,6832	1,0481	1,6832	1,0481	2,8693	1,7732	3,4624	2,1357
2,00	0,00	0,4011	0,2388	1,0979	0,6320	1,7946	1,0253	1,7946	1,0253	3,1881	1,8117	3,8849	2,2050
	0,05	0,4131	0,2463	1,0926	0,6301	1,7721	1,0139	1,7721	1,0139	3,1310	1,7815	3,8105	2,1653
	0,10	0,4260	0,2545	1,0874	0,6284	1,7488	1,0023	1,7488	1,0023	3,0716	1,7501	3,7330	2,1240
	0,15	0,4399	0,2632	1,0823	0,6267	1,7248	0,9903	1,7248	0,9903	3,0098	1,7173	3,6522	2,0808
	0,20	0,4548	0,2727	1,0774	0,6253	1,7000	0,9779	1,7000	0,9779	2,9452	1,6831	3,5678	2,0357
	0,25	0,4709	0,2830	1,0727	0,6241	1,6744	0,9651	1,6744	0,9651	2,8778	1,6473	3,4795	1,9884
	0,30	0,4885	0,2942	1,0682	0,6231	1,6479	0,9521	1,6479	0,9521	2,8073	1,6099	3,3870	1,9388
2,50	0,00	0,3924	0,2204	1,0694	0,5812	1,7465	0,9420	1,7465	0,9420	3,1007	1,6636	3,7777	2,0244
	0,05	0,4045	0,2276	1,0655	0,5801	1,7265	0,9326	1,7265	0,9326	3,0484	1,6375	3,7094	1,9900
	0,10	0,4175	0,2353	1,0616	0,5790	1,7057	0,9228	1,7057	0,9228	2,9939	1,6103	3,6380	1,9541
	0,15	0,4314	0,2436	1,0578	0,5781	1,6842	0,9127	1,6842	0,9127	2,9369	1,5819	3,5633	1,9165
	0,20	0,4465	0,2525	1,0542	0,5774	1,6619	0,9023	1,6619	0,9023	2,8773	1,5521	3,4850	1,8770
	0,25	0,4628	0,2623	1,0508	0,5769	1,6388	0,8916	1,6388	0,8916	2,8148	1,5208	3,4028	1,8355
	0,30	0,4805	0,2730	1,0477	0,5767	1,6149	0,8805	1,6149	0,8805	2,7492	1,4880	3,3164	1,7918
3,00	0,00	0,3843	0,2060	1,0433	0,5411	1,7022	0,8762	1,7022	0,8762	3,0201	1,5464	3,6791	1,8815
	0,05	0,3965	0,2128	1,0404	0,5405	1,6843	0,8682	1,6843	0,8682	2,9722	1,5236	3,6161	1,8513
	0,10	0,4096	0,2202	1,0377	0,5400	1,6657	0,8599	1,6657	0,8599	2,9219	1,4997	3,5500	1,8195
	0,15	0,4236	0,2281	1,0350	0,5397	1,6464	0,8513	1,6464	0,8513	2,8693	1,4746	3,4807	1,7862
	0,20	0,4388	0,2367	1,0326	0,5396	1,6264	0,8425	1,6264	0,8425	2,8140	1,4483	3,4078	1,7512
	0,25	0,4552	0,2460	1,0304	0,5397	1,6056	0,8333	1,6056	0,8333	2,7559	1,4206	3,3311	1,7142
	0,30	0,4731	0,2562	1,0285	0,5400	1,5839	0,8238	1,5839	0,8238	2,6947	1,3915	3,2501	1,6753

3,50	0,00	0,3769	0,1942	1,0191	0,5081	1,6613	0,8221	2,3035	1,1361	2,9457	1,4501	3,5879	1,7640
	0,05	0,3891	0,2007	1,0172	0,5080	1,6453	0,8153	2,2734	1,1226	2,9014	1,4299	3,5295	1,7371
	0,10	0,4022	0,2078	1,0154	0,5080	1,6286	0,8082	2,2418	1,1084	2,8550	1,4086	3,4682	1,7088
	0,15	0,4164	0,2154	1,0138	0,5082	1,6113	0,8009	2,2087	1,0936	2,8062	1,3863	3,4036	1,6790
	0,20	0,4316	0,2237	1,0124	0,5085	1,5932	0,7933	2,1740	1,0780	2,7548	1,3628	3,3356	1,6476
	0,25	0,4481	0,2327	1,0112	0,5090	1,5744	0,7854	2,1375	1,0617	2,7006	1,3380	3,2637	1,6144
	0,30	0,4661	0,2425	1,0104	0,5098	1,5547	0,7772	2,0991	1,0445	2,6434	1,3119	3,1877	1,5792
4,00	0,00	0,3700	0,1842	0,9967	0,4804	1,6233	0,7765	2,2500	1,0726	2,8766	1,3688	3,5033	1,6649
	0,05	0,3823	0,1906	0,9956	0,4806	1,6089	0,7706	2,2223	1,0607	2,8356	1,3507	3,4490	1,6407
	0,10	0,3954	0,1974	0,9947	0,4810	1,5940	0,7645	2,1933	1,0481	2,7925	1,3317	3,3918	1,6153
	0,15	0,4096	0,2048	0,9940	0,4815	1,5783	0,7582	2,1627	1,0349	2,7471	1,3116	3,3315	1,5884
	0,20	0,4249	0,2128	0,9934	0,4822	1,5620	0,7516	2,1306	1,0211	2,6992	1,2905	3,2678	1,5599
	0,25	0,4414	0,2214	0,9932	0,4831	1,5450	0,7448	2,0968	1,0065	2,6486	1,2681	3,2004	1,5298
	0,30	0,4595	0,2309	0,9933	0,4843	1,5272	0,7377	2,0611	0,9911	2,5949	1,2445	3,1288	1,4978

		Charge cocentree											
		DT = 0		DT = 10		DT = 20		DT = 30		DT = 40		DT = 50	
ta (mm)	D	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN
0,5	0	1,1611	1,0008	1,9289	1,6217	2,6968	2,2427	3,4646	2,8638	4,2324	3,4847	5,0002	4,1057
	0,05	1,1892	1,0274	1,935	1,631	2,6807	2,2347	3,4264	2,8382	4,1721	3,4417	4,9179	4,0453
	0,1	1,2193	1,0561	1,9423	1,6419	2,6652	2,2274	3,3882	2,8132	4,1111	3,3988	4,8341	3,9846
	0,15	1,2513	1,0866	1,9506	1,6536	2,6499	2,2205	3,3492	2,7875	4,0485	3,3543	4,7478	3,9213
	0,2	1,2858	1,1199	1,9606	1,6675	2,6354	2,215	3,3102	2,7625	3,985	3,3101	4,6598	3,8577
	0,25	1,3229	1,1559	1,9723	1,6834	2,6217	2,2107	3,271	2,7381	3,9204	3,2654	4,5697	3,7927
	0,3	1,3631	1,195	1,986	1,7014	2,6089	2,2076	3,2317	2,7139	3,8546	3,2201	4,4775	3,7264
1	0	1,1255	0,8054	1,8673	1,3064	2,6092	1,8073	3,351	2,3083	4,0928	2,8094	4,8346	3,3104
	0,05	1,1544	0,8278	1,8759	1,3155	2,5975	1,8033	3,3191	2,291	4,0406	2,7787	4,7622	3,2663
	0,1	1,1852	0,8518	1,8858	1,3258	2,5864	1,7999	3,2869	2,2737	3,9875	2,7478	4,688	3,2218
	0,15	1,2183	0,8777	1,897	1,3373	2,5757	1,7969	3,2544	2,2564	3,9331	2,716	4,6118	3,1755
	0,2	1,2537	0,9056	1,9097	1,3503	2,5657	1,7949	3,2217	2,2394	3,8777	2,684	4,5337	3,1286
	0,25	1,2918	0,9358	1,9242	1,3648	2,5564	1,7937	3,1888	2,2227	3,821	2,6516	4,4532	3,0806
	0,3	1,3329	0,9685	1,9404	1,3811	2,5478	1,7936	3,1552	2,2061	3,7627	2,6185	4,3701	3,031
1,5	0	1,0933	0,7024	1,8116	1,139	2,5298	1,5757	3,248	2,0122	3,9663	2,4489	4,6845	2,8854
	0,05	1,1228	0,7228	1,8224	1,1483	2,522	1,574	3,2214	1,9995	3,921	2,4251	4,6206	2,8507
	0,1	1,1544	0,7447	1,8344	1,1588	2,5146	1,573	3,1948	1,9872	3,875	2,4013	4,5552	2,8156
	0,15	1,1879	0,768	1,8478	1,1703	2,5077	1,5725	3,1675	1,9747	3,8274	2,3768	4,4872	2,779
	0,2	1,2241	0,7935	1,8628	1,1832	2,5014	1,5729	3,1401	1,9625	3,7788	2,3521	4,4175	2,7419
	0,25	1,2628	0,8208	1,8792	1,1973	2,4957	1,5737	3,112	1,95	3,7284	2,3264	4,3448	2,7028
	0,3	1,3049	0,8506	1,898	1,2132	2,4911	1,5757	3,0842	1,9382	3,6774	2,3009	4,2705	2,6634
2	0	1,0639	0,6339	1,7606	1,027	2,4574	1,4204	3,1541	1,8136	3,8509	2,2069	4,5476	2,6001
	0,05	1,0938	0,6528	1,7733	1,0366	2,4528	1,4204	3,1322	1,8042	3,8117	2,1881	4,4912	2,5719
	0,1	1,1258	0,6733	1,7873	1,0474	2,4487	1,4212	3,1101	1,7952	3,7716	2,1693	4,433	2,5431
	0,15	1,1599	0,6952	1,8023	1,0587	2,4448	1,4222	3,0873	1,7858	3,7298	2,1493	4,3722	2,5127

	0,2	1,1966	0,7188	1,8192	1,0714	2,4418	1,4241	3,0645	1,7767	3,6871	2,1293	4,3097	2,4819
	0,25	1,2361	0,7444	1,8378	1,0856	2,4395	1,4267	3,0412	1,7678	3,6429	2,1087	4,2447	2,4499
	0,3	1,2787	0,7722	1,8584	1,1012	2,4382	1,4301	3,0179	1,7591	3,5976	2,088	4,1773	2,4169
2,5	0	1,0371	0,5829	1,7141	0,9437	2,3912	1,3044	3,0683	1,6653	3,7454	2,0261	4,4225	2,3869
	0,05	1,0672	0,6008	1,7282	0,9533	2,3892	1,3058	3,0502	1,6583	3,7112	2,0108	4,3722	2,3633
	0,1	1,0995	0,6203	1,7436	0,9641	2,3877	1,3078	3,0319	1,6515	3,676	1,9954	4,3201	2,3392
	0,015	1,1339	0,6409	1,7602	0,9755	2,3866	1,3101	3,0129	1,6447	3,6393	1,9793	4,2656	2,3137
	0,2	1,1711	0,6634	1,7787	0,9882	2,3864	1,3132	2,9942	1,638	3,6019	1,9629	4,2096	2,2878
	0,25	1,211	0,6877	1,799	1,0023	2,387	1,3169	2,975	1,6315	3,563	1,9461	4,151	2,2607
	0,03	1,2541	0,7141	1,8214	1,0179	2,3885	1,3215	2,9557	1,6254	3,5229	1,9293	4,0901	2,233
3	0	1,0122	0,5427	1,6712	0,8779	2,3302	1,2129	2,9892	1,5481	3,6481	1,8832	4,3071	2,2184
	0,05	1,0426	0,56	1,6865	0,8876	2,3304	1,2152	2,9743	1,543	3,6182	1,8706	4,262	2,1982
	0,1	1,0751	0,5785	1,7032	0,8983	2,3313	1,2183	2,9594	1,5381	3,5875	1,8581	4,2156	2,178
	0,15	1,1098	0,5982	1,7213	0,9099	2,3327	1,2217	2,9441	1,5332	3,5555	1,8449	4,1668	2,1564
	0,2	1,1472	0,6197	1,741	0,9226	2,3348	1,2256	2,9286	1,5284	3,5224	1,8313	4,1162	2,1342
	0,25	1,1876	0,643	1,7627	0,9367	2,3379	1,2304	2,913	1,524	3,4882	1,8177	4,0634	2,1113
	0,3	1,2311	0,6683	1,7865	0,9521	2,3419	1,2359	2,8974	1,5197	3,4527	1,8035	4,0082	2,0874
3,5	0	0,9893	0,5099	1,6316	0,8239	2,2738	1,1378	2,916	1,4518	3,5582	1,7658	4,2004	2,0797
	0,05	1,0198	0,5264	1,6479	0,8337	2,276	1,1408	2,904	1,4481	3,5321	1,7554	4,1602	2,0628
	0,1	1,0524	0,5441	1,6657	0,8444	2,2788	1,1446	2,892	1,4447	3,5052	1,745	4,1184	2,0453
	0,15	1,0874	0,5633	1,6849	0,856	2,2823	1,1487	2,8798	1,4415	3,4772	1,7341	4,0747	2,0268
	0,2	1,125	0,5839	1,7057	0,8686	2,2864	1,1534	2,8672	1,4382	3,448	1,723	4,0288	2,0077
	0,25	1,1655	0,6062	1,7286	0,8825	2,2918	1,159	2,8548	1,4352	3,418	1,7115	3,9811	1,9877
	0,3	1,2094	0,6306	1,7537	0,8979	2,2981	1,1653	2,8424	1,4326	3,3868	1,7001	3,9312	1,9674
4	0	0,968	0,4822	1,5947	0,7784	2,2213	1,0744	2,848	1,3707	3,4746	1,6668	4,1013	1,963
	0,05	0,9986	0,4982	1,612	0,7883	2,2254	1,0784	2,8386	1,3683	3,452	1,6585	4,0654	1,9486
	0,1	1,0313	0,5154	1,6306	0,799	2,2299	1,0827	2,8292	1,3663	3,4285	1,6499	4,0278	1,9336
	0,15	1,0663	0,5338	1,6507	0,8105	2,2351	1,0874	2,8194	1,364	3,4038	1,6408	3,9882	1,9175
	0,2	1,1041	0,5537	1,6726	0,8232	2,2412	1,0926	2,8098	1,362	3,3783	1,6315	3,947	1,9011
	0,25	1,1449	0,5754	1,6967	0,8371	2,2485	1,0989	2,8003	1,3605	3,3521	1,6221	3,904	1,8839
	0,3	1,1889	0,5989	1,7228	0,8523	2,2567	1,1057	2,7906	1,3591	3,3245	1,6126	3,8584	1,8661

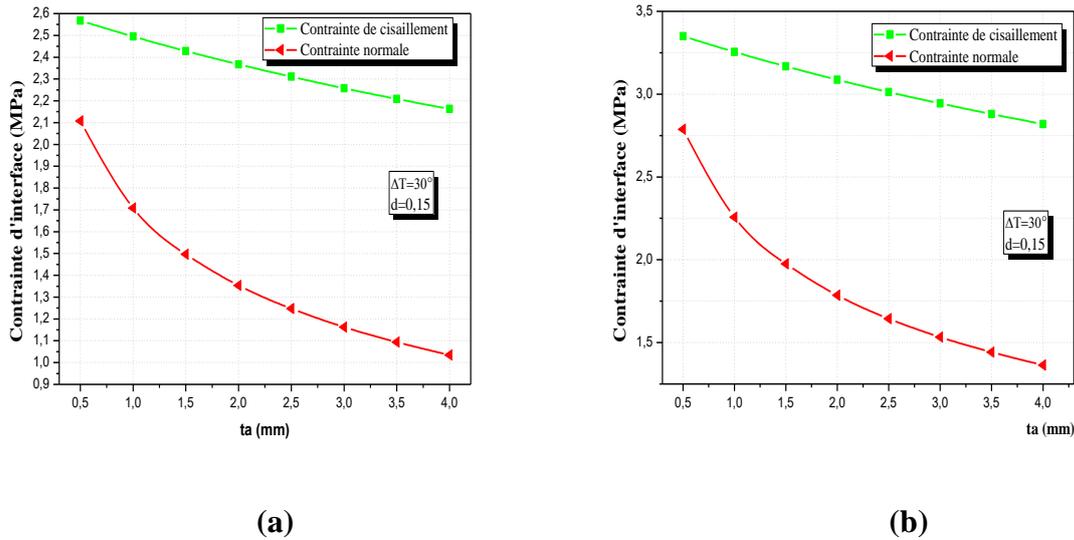


Figure IV.7 Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive t_a sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée ($d = 0.15$) et renforcée par matériaux composite sous une température de ($DT=30$) : (a) charge répartie, (b) charge concentrée à l'extrémité.

IV.8.4 Effet de la rigidité de la colle d'adhésive E_a

Dans le contexte de la charge répartie . L'effet de la rigidité de la colle « E_a » sur les contraintes d'interface maximales d'une poutre console en béton armée endommagée ($d = 0.15$) réparer par composite stratifiée sous une température de ($DT=30$) est illustré à la figure (IV.8) et le tableau (IV.7)

Lorsque la rigidité de la colle « E_a » augmente plus les contraintes d'interface maximales (contraintes en extrémité de la plaque) s'accroissent d'une façon significative .

Et Dans le contexte de la charge répartie, on remarque que lorsque la rigidité, notée " E_a ", augmente, les contraintes d'interface maximales demeurent constantes.

Tableau IV.7: L'influence de la rigidité de la colle d'adhésive E_a sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée et renforcée par matériaux composite

		charge repartie											
		DT = 0		DT = 10		DT = 20		DT = 30		DT = 40		DT = 50	
Ea (MPa)	D	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN
1000	0,00	0,4011	0,2388	1,0979	0,6320	1,7946	1,0253	2,4914	1,4185	3,1881	1,8117	3,8849	2,2050
	0,05	0,4131	0,2463	1,0926	0,6301	1,7721	1,0139	2,4516	1,3977	3,1310	1,7815	3,8105	2,1653
	0,10	0,4260	0,2545	1,0874	0,6284	1,7488	1,0023	2,4102	1,3762	3,0716	1,7501	3,7330	2,1240
	0,15	0,4399	0,2632	1,0823	0,6267	1,7248	0,9903	2,3673	1,3538	3,0098	1,7173	3,6522	2,0808
	0,20	0,4548	0,2727	1,0774	0,6253	1,7000	0,9779	2,3226	1,3305	2,9452	1,6831	3,5678	2,0357
	0,25	0,4709	0,2830	1,0727	0,6241	1,6744	0,9651	2,2761	1,3062	2,8778	1,6473	3,4795	1,9884
	0,03	0,4885	0,2942	1,0682	0,6231	1,6479	0,9521	2,2276	1,2810	2,8073	1,6099	3,3870	1,9388
2000	0,00	0,4011	0,2388	1,0979	0,6320	1,7946	1,0253	2,4914	1,4185	3,1881	1,8117	3,8849	2,2050
	0,05	0,4131	0,2463	1,0926	0,6301	1,7721	1,0139	2,4516	1,3977	3,1310	1,7815	3,8105	2,1653
	0,10	0,4260	0,2545	1,0874	0,6284	1,7488	1,0023	2,4102	1,3762	3,0716	1,7501	3,7330	2,1240
	0,15	0,4399	0,2632	1,0823	0,6267	1,7248	0,9903	2,3673	1,3538	3,0098	1,7173	3,6522	2,0808
	0,20	0,4548	0,2727	1,0774	0,6253	1,7000	0,9779	2,3226	1,3305	2,9452	1,6831	3,5678	2,0357
	0,25	0,4709	0,2830	1,0727	0,6241	1,6744	0,9651	2,2761	1,3062	2,8778	1,6473	3,4795	1,9884
	0,03	0,4885	0,2942	1,0682	0,6231	1,6479	0,9521	2,2276	1,2810	2,8073	1,6099	3,3870	1,9388
3000	0,00	0,4011	0,2388	1,0979	0,6320	1,7946	1,0253	2,4914	1,4185	3,1881	1,8117	3,8849	2,2050
	0,05	0,4131	0,2463	1,0926	0,6301	1,7721	1,0139	2,4516	1,3977	3,1310	1,7815	3,8105	2,1653
	0,10	0,4260	0,2545	1,0874	0,6284	1,7488	1,0023	2,4102	1,3762	3,0716	1,7501	3,7330	2,1240
	0,15	0,4399	0,2632	1,0823	0,6267	1,7248	0,9903	2,3673	1,3538	3,0098	1,7173	3,6522	2,0808
	0,20	0,4548	0,2727	1,0774	0,6253	1,7000	0,9779	2,3226	1,3305	2,9452	1,6831	3,5678	2,0357
	0,25	0,4709	0,2830	1,0727	0,6241	1,6744	0,9651	2,2761	1,3062	2,8778	1,6473	3,4795	1,9884
	0,03	0,4885	0,2942	1,0682	0,6231	1,6479	0,9521	2,2276	1,2810	2,8073	1,6099	3,3870	1,9388
4000	0,00	0,4011	0,2388	1,0979	0,6320	1,7946	1,0253	2,4914	1,4185	3,1881	1,8117	3,8849	2,2050
	0,05	0,4131	0,2463	1,0926	0,6301	1,7721	1,0139	2,4516	1,3977	3,1310	1,7815	3,8105	2,1653
	0,10	0,4260	0,2545	1,0874	0,6284	1,7488	1,0023	2,4102	1,3762	3,0716	1,7501	3,7330	2,1240
	0,15	0,4399	0,2632	1,0823	0,6267	1,7248	0,9903	2,3673	1,3538	3,0098	1,7173	3,6522	2,0808
	0,20	0,4548	0,2727	1,0774	0,6253	1,7000	0,9779	2,3226	1,3305	2,9452	1,6831	3,5678	2,0357
	0,25	0,4709	0,2830	1,0727	0,6241	1,6744	0,9651	2,2761	1,3062	2,8778	1,6473	3,4795	1,9884
	0,03	0,4885	0,2942	1,0682	0,6231	1,6479	0,9521	2,2276	1,2810	2,8073	1,6099	3,3870	1,9388
5000	0,00	0,4011	0,2388	1,0979	0,6320	1,7946	1,0253	2,4914	1,4185	3,1881	1,8117	3,8849	2,2050
	0,05	0,4131	0,2463	1,0926	0,6301	1,7721	1,0139	2,4516	1,3977	3,1310	1,7815	3,8105	2,1653
	0,10	0,4260	0,2545	1,0874	0,6284	1,7488	1,0023	2,4102	1,3762	3,0716	1,7501	3,7330	2,1240
	0,15	0,4399	0,2632	1,0823	0,6267	1,7248	0,9903	2,3673	1,3538	3,0098	1,7173	3,6522	2,0808
	0,20	0,4548	0,2727	1,0774	0,6253	1,7000	0,9779	2,3226	1,3305	2,9452	1,6831	3,5678	2,0357
	0,25	0,4709	0,2830	1,0727	0,6241	1,6744	0,9651	2,2761	1,3062	2,8778	1,6473	3,4795	1,9884
	0,30	0,4885	0,2942	1,0682	0,6231	1,6479	0,9521	2,2276	1,2810	2,8073	1,6099	3,3870	1,9388
6000	0,00	0,4011	0,2388	1,0979	0,6320	1,7946	1,0253	2,4914	1,4185	3,1881	1,8117	3,8849	2,2050
	0,05	0,4131	0,2463	1,0926	0,6301	1,7721	1,0139	2,4516	1,3977	3,1310	1,7815	3,8105	2,1653
	0,10	0,4260	0,2545	1,0874	0,6284	1,7488	1,0023	2,4102	1,3762	3,0716	1,7501	3,7330	2,1240
	0,15	0,4399	0,2632	1,0823	0,6267	1,7248	0,9903	2,3673	1,3538	3,0098	1,7173	3,6522	2,0808
	0,20	0,4548	0,2727	1,0774	0,6253	1,7000	0,9779	2,3226	1,3305	2,9452	1,6831	3,5678	2,0357
	0,25	0,4709	0,2830	1,0727	0,6241	1,6744	0,9651	2,2761	1,3062	2,8778	1,6473	3,4795	1,9884

7000	0,30	0,4885	0,2942	1,0682	0,6231	1,6479	0,9521	2,2276	1,2810	2,8073	1,6099	3,3870	1,9388
	0,00	0,4011	0,2388	1,0979	0,6320	1,7946	1,0253	2,4914	1,4185	3,1881	1,8117	3,8849	2,2050
	0,05	0,4131	0,2463	1,0926	0,6301	1,7721	1,0139	2,4516	1,3977	3,1310	1,7815	3,8105	2,1653
	0,10	0,4260	0,2545	1,0874	0,6284	1,7488	1,0023	2,4102	1,3762	3,0716	1,7501	3,7330	2,1240
	0,15	0,4399	0,2632	1,0823	0,6267	1,7248	0,9903	2,3673	1,3538	3,0098	1,7173	3,6522	2,0808
	0,20	0,4548	0,2727	1,0774	0,6253	1,7000	0,9779	2,3226	1,3305	2,9452	1,6831	3,5678	2,0357
	0,25	0,4709	0,2830	1,0727	0,6241	1,6744	0,9651	2,2761	1,3062	2,8778	1,6473	3,4795	1,9884
8000	0,30	0,4885	0,2942	1,0682	0,6231	1,6479	0,9521	2,2276	1,2810	2,8073	1,6099	3,3870	1,9388
	0,00	0,4011	0,2388	1,0979	0,6320	1,7946	1,0253	2,4914	1,4185	3,1881	1,8117	3,8849	2,2050
	0,05	0,4131	0,2463	1,0926	0,6301	1,7721	1,0139	2,4516	1,3977	3,1310	1,7815	3,8105	2,1653
	0,10	0,4260	0,2545	1,0874	0,6284	1,7488	1,0023	2,4102	1,3762	3,0716	1,7501	3,7330	2,1240
	0,15	0,4399	0,2632	1,0823	0,6267	1,7248	0,9903	2,3673	1,3538	3,0098	1,7173	3,6522	2,0808
	0,20	0,4548	0,2727	1,0774	0,6253	1,7000	0,9779	2,3226	1,3305	2,9452	1,6831	3,5678	2,0357
	0,25	0,4709	0,2830	1,0727	0,6241	1,6744	0,9651	2,2761	1,3062	2,8778	1,6473	3,4795	1,9884

		Charge concentrée											
		DT = 0		DT = 10		DT = 20		DT = 30		DT = 40		DT = 50	
Ea (MPa)	D	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN
1000	0	0,898	0,4039	1,4731	0,6493	2,0482	0,8946	2,6234	1,14	3,1986	1,3855	3,7737	1,6308
	0,05	0,9285	0,4181	1,4929	0,6591	2,0573	0,9	2,6216	1,1409	3,1861	1,3818	3,7504	1,6225
	0,1	0,9613	0,4335	1,5142	0,6697	2,0672	0,9058	2,6201	1,142	3,173	1,3782	3,726	1,6142
	0,15	0,9965	0,45	1,5372	0,6811	2,0779	0,9121	2,6187	1,1432	3,1594	1,3743	3,7001	1,6053
	0,2	1,0346	0,468	1,5622	0,6936	2,0898	0,9191	2,6175	1,1448	3,1452	1,3704	3,6728	1,5959
	0,25	1,0758	0,4875	1,5895	0,7073	2,1031	0,927	2,6167	1,1466	3,1304	1,3664	3,644	1,5863
	0,3	1,1206	0,5088	1,6191	0,7222	2,1177	0,9356	2,6163	1,1491	3,1149	1,3626	3,6135	1,5761
2000	0	1,0128	0,543	1,6721	0,7883	2,3314	1,2135	2,9907	1,5489	3,65	1,8842	4,3093	2,2196
	0,05	1,0432	0,5603	1,6874	0,8881	2,3316	1,2158	2,9758	1,5438	3,62	1,8717	4,2642	2,1994
	0,1	1,0758	0,5789	1,7043	0,8989	2,3328	1,2191	2,9613	1,5392	3,5897	1,8593	4,2182	2,1794
	0,15	1,1106	0,5987	1,7223	0,9105	2,334	1,2223	2,9458	1,5342	3,5576	1,8459	4,1693	2,1577
	0,2	1,1481	0,6202	1,7423	0,9233	2,3364	1,2264	2,9306	1,5295	3,5248	1,8327	4,119	2,1357
	0,25	1,1884	0,6435	1,7639	0,9373	2,3394	1,2312	2,9149	1,525	3,4904	1,8189	4,066	2,1127
	0,3	1,232	0,6688	1,7878	0,9528	2,3436	1,2368	2,8994	1,5208	3,4552	1,8049	4,011	2,089
3000	0	1,0639	0,6339	1,7606	1,027	2,4574	1,4204	3,1541	1,8136	3,8509	2,2069	4,5476	2,6001
	0,05	1,0938	0,6528	1,7733	1,0366	2,4528	1,4204	3,1322	1,8042	3,8117	2,1881	4,4912	2,5719
	0,1	1,1258	0,6733	1,7873	1,0474	2,4487	1,4212	3,1101	1,7952	3,7716	2,1693	4,433	2,5431
	0,15	1,1599	0,6952	1,8023	1,0587	2,4448	1,4222	3,0873	1,7858	3,7298	2,1493	4,3722	2,5127
	0,2	1,1966	0,7188	1,8192	1,0714	2,4418	1,4241	3,0645	1,7767	3,6871	2,1293	4,3097	2,4819
	0,25	1,2361	0,7444	1,8378	1,0856	2,4395	1,4267	3,0412	1,7678	3,6429	2,1087	4,2447	2,4499
	0,3	1,2787	0,7722	1,8584	1,1012	2,4382	1,4301	3,0179	1,7591	3,5976	2,088	4,1773	2,4169
4000	0	1,093	0,7022	1,8111	1,1386	2,5292	1,5753	3,2472	2,0116	3,9653	2,4482	4,6834	2,8847
	0,05	1,1225	0,7226	1,8218	1,1479	2,5212	1,5734	3,2206	1,999	3,9199	2,4244	4,6193	2,8499
	0,1	1,154	0,7445	1,834	1,1585	2,514	1,5726	3,1941	1,9868	3,8741	2,4007	4,5541	2,815
	0,15	1,1875	0,7678	1,8471	1,1699	2,5068	1,5719	3,1665	1,9739	3,8262	2,3761	4,4858	2,778
	0,2	1,2237	0,7933	1,8621	1,1828	2,5006	1,5723	3,1391	1,9618	3,7776	2,3513	4,4161	2,7409

	0,25	1,2626	0,8206	1,8788	1,197	2,4951	1,5733	3,1113	1,9495	3,7275	2,3258	4,3438	2,7022
	0,3	1,3044	0,8503	1,8974	1,2128	2,4903	1,5752	3,0832	1,9376	3,6762	2,3001	4,2691	2,6626
5000	0	1,1118	0,7579	1,8436	1,2293	2,5754	1,7007	3,3072	2,1722	4,039	2,6435	4,7708	3,1149
	0,05	1,1409	0,7794	1,8531	1,2385	2,5653	1,6976	3,2775	2,1567	3,9897	2,616	4,7019	3,0752
	0,1	1,172	0,8024	1,864	1,2491	2,5559	1,6955	3,2478	2,142	3,9397	2,5885	4,6316	3,035
	0,15	1,2052	0,8271	1,8759	1,2605	2,5466	1,6935	3,2173	2,1268	3,888	2,5599	4,5587	2,9932
	0,2	1,2409	0,8538	1,8894	1,273	2,538	1,6923	3,1866	2,1117	3,8351	2,5308	4,4838	2,9502
	0,25	1,2793	0,8827	1,9048	1,2874	2,5302	1,6921	3,1557	2,0969	3,7812	2,5017	4,4067	2,9064
	0,3	1,3207	0,914	1,9221	1,3034	2,5233	1,6929	3,1246	2,0825	3,7259	2,4719	4,3272	2,8614
6000	0	1,1249	0,8049	1,8664	1,3057	2,6078	1,8063	3,3493	2,3071	4,0908	2,808	4,8322	3,3087
	0,05	1,1538	0,8273	1,875	1,3149	2,5962	1,8022	3,3173	2,2897	4,0385	2,7772	4,7597	3,2646
	0,1	1,1846	0,8514	1,8848	1,3252	2,585	2,585	3,2852	2,2725	3,9854	2,7463	4,6856	3,22
	0,15	1,2175	0,8771	1,8959	1,3365	2,5742	1,7959	3,2526	2,2552	3,9309	2,7144	4,6093	3,1737
	0,2	1,2528	0,9049	1,9085	1,3494	2,564	1,7936	3,2197	2,2379	3,8752	2,6821	4,5309	3,1265
	0,25	1,2909	0,9352	1,9228	1,3638	2,5547	1,7925	3,1865	2,2211	3,8184	2,6497	4,4503	3,0785
	0,3	1,3319	0,9678	1,9389	1,3802	2,5459	1,7922	3,153	2,2045	3,76	2,6166	4,3671	3,0289
7000	0	1,1346	0,8461	1,8832	1,3723	2,6317	1,8986	3,3803	2,4249	4,1288	2,951	4,8774	3,4773
	0,05	1,1633	0,8693	1,891	1,3813	2,6188	1,8933	3,3466	2,4054	4,0744	2,9175	4,8022	3,4296
	0,1	1,194	0,8944	1,9003	1,3918	2,6067	1,8893	3,313	2,3867	4,0194	2,8842	4,7258	3,3816
	0,15	1,2266	0,9211	1,9106	1,4033	2,5946	1,8853	3,2786	2,3675	3,9626	2,8497	4,6466	3,3318
	0,2	1,2617	0,95	1,9224	1,416	2,5832	1,8823	3,2439	2,3483	3,9047	2,8145	4,5654	3,2806
	0,25	1,2995	0,9813	1,936	1,4308	2,5725	1,8802	3,209	2,3296	3,8455	2,7791	4,482	3,2285
	0,3	1,3403	1,0154	1,9515	1,4474	2,5628	1,8795	3,1741	2,3115	3,7854	2,7436	4,3966	3,1756
8000	0	1,1421	0,8827	1,8961	1,4315	2,6501	1,9803	3,4042	2,5292	4,1582	3,0781	4,9122	3,6268
	0,05	1,1706	0,9067	1,9035	1,4405	2,6363	1,9744	3,3692	2,5082	4,1021	3,042	4,8349	3,5758
	0,1	1,2011	0,9326	1,9121	1,451	2,6231	1,9693	3,3342	2,4878	4,0452	3,0062	4,7562	3,5246
	0,15	1,2335	0,9602	1,9217	1,4624	2,6101	1,9647	3,2983	2,4669	3,9866	2,9692	4,6749	3,4715
	0,2	1,2683	0,9899	1,933	1,4754	2,5978	1,961	3,2624	2,4463	3,9271	2,9318	4,5918	3,4173
	0,25	1,306	1,0224	1,9461	1,4904	2,5862	1,9584	3,2263	2,4263	3,8664	2,8941	4,5065	3,3621
	0,3	1,3465	1,0576	1,961	1,5073	2,5755	1,957	3,19	2,4066	3,8045	2,8563	4,419	3,3059

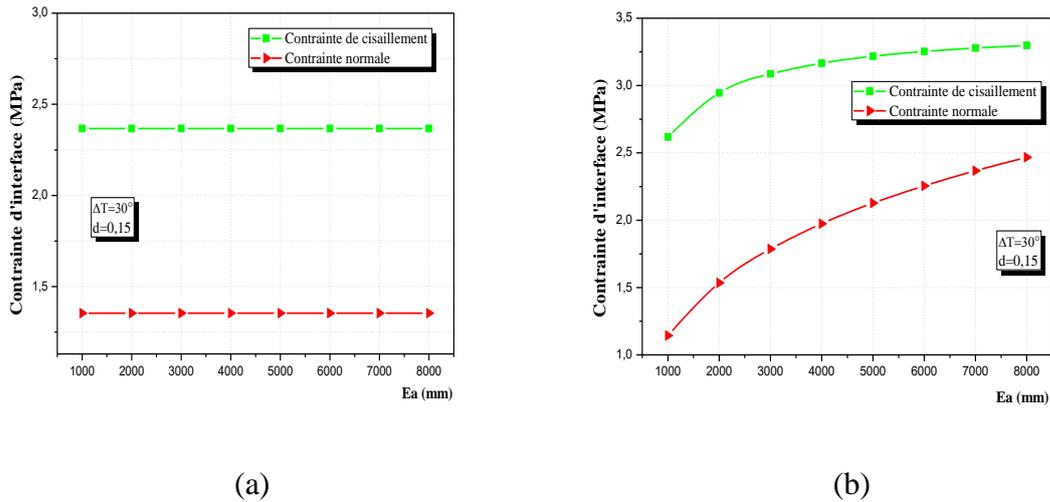


Figure IV.8 : Effet de la rigidité de la colle Ea sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée ($d = 0.15$) renforcée par matériaux composites sous un températures de ($DT=30$) : (a) charge répartie, (b) charge concentrée

IV.8.5 Effet de la largeur ($b2$) et (ba)

L'effet de la largeur ($b2$) et (ba) sur la variation des contraintes d'interface maximales d'une poutre console en béton armée endommagée ($d = 0.15$) réparer par composite stratifiée sous une température de ($DT=30$) est illustré à la figure (IV.7) et le tableau (IV.4).

Lorsque l'augmentation de la largeur ($b2$) et (ba) mène à une réduction significative des contraintes d'interface maximale.

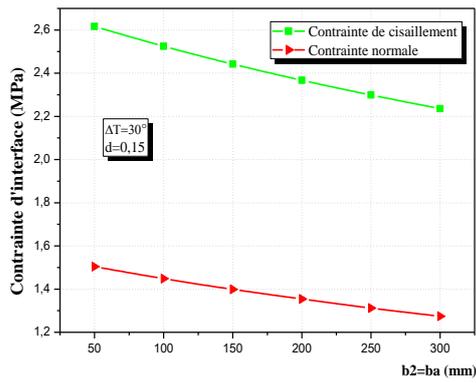
Tableau IV.6: L'influence de la largeur ($b2$) et (ba) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée renforcée par matériaux composites.

		charge repartie											
		DT = 0		DT = 10		DT = 20		DT = 30		DT = 40		DT = 50	
$b2 = ba$ (mm)	D	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN
50	0,00	0,4447	0,2650	1,2018	0,6946	1,9589	1,1242	2,7160	1,5538	3,4731	1,9834	4,2302	2,4130
	0,05	0,4603	0,2747	1,2014	0,6956	1,9425	1,1166	2,6836	1,5375	3,4247	1,9584	4,1658	2,3794
	0,10	0,4773	0,2853	1,2016	0,6971	1,9260	1,1090	2,6504	1,5208	3,3748	1,9327	4,0991	2,3445
	0,15	0,4958	0,2969	1,2026	0,6992	1,9094	1,1015	2,6163	1,5038	3,3231	1,9061	4,0299	2,3084
	0,20	0,5161	0,3096	1,2045	0,7018	1,8929	1,0941	2,5813	1,4863	3,2697	1,8786	3,9581	2,2708

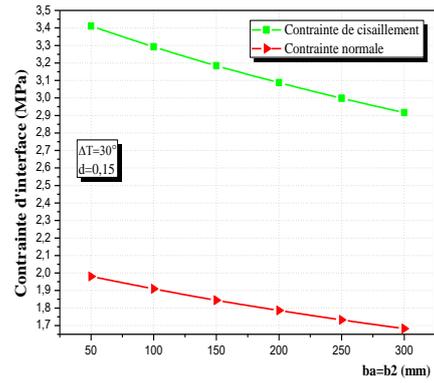
	0,25	0,5384	0,3236	1,2075	0,7053	1,8765	1,0869	2,5455	1,4685	3,2145	1,8502	3,8836	2,2318
	0,30	0,5633	0,3392	1,2118	0,7096	1,8604	1,0801	2,5090	1,4505	3,1575	1,8209	3,8061	2,1913
100	0,00	0,4287	0,2554	1,1640	0,6719	1,8993	1,0883	2,6346	1,5048	3,3698	1,9212	4,1051	2,3377
	0,05	0,4430	0,2643	1,1617	0,6718	1,8804	1,0792	2,5992	1,4867	3,3179	1,8941	4,0367	2,3016
	0,10	0,4584	0,2739	1,1598	0,6719	1,8612	1,0700	2,5626	1,4680	3,2641	1,8660	3,9655	2,2640
	0,15	0,4750	0,2844	1,1583	0,6725	1,8416	1,0606	2,5249	1,4487	3,2082	1,8368	3,8914	2,2249
	0,20	0,4932	0,2958	1,1574	0,6735	1,8216	1,0512	2,4859	1,4288	3,1501	1,8065	3,8143	2,1842
	0,25	0,5131	0,3084	1,1572	0,6750	1,8014	1,0417	2,4455	1,4083	3,0897	1,7750	3,7338	2,1416
	0,30	0,5350	0,3222	1,1580	0,6772	1,7809	1,0322	2,4039	1,3872	3,0268	1,7422	3,6498	2,0972
	0,00	0,4143	0,2467	1,1295	0,6511	1,7946	1,0253	2,5600	1,4598	3,2752	1,8642	3,9905	2,2686
150	0,05	0,4273	0,2549	1,1256	0,6500	1,7721	1,0139	2,5222	1,4403	3,2205	1,8354	3,9187	2,2305
	0,10	0,4414	0,2637	1,1219	0,6491	1,7488	1,0023	2,4830	1,4200	3,1635	1,8054	3,8441	2,1909
	0,15	0,4565	0,2732	1,1185	0,6485	1,7248	0,9903	2,4423	1,3990	3,1043	1,7742	3,7662	2,1495
	0,20	0,4729	0,2836	1,1153	0,6481	1,7000	0,9779	2,4001	1,3772	3,0425	1,7417	3,6850	2,1062
	0,25	0,4908	0,2949	1,1126	0,6481	1,6744	0,9651	2,3563	1,3546	2,9782	1,7078	3,6000	2,0610
	0,30	0,5103	0,3074	1,1105	0,6486	1,6479	0,9521	2,3108	1,3311	2,9110	1,6724	3,5111	2,0136
	0,00	0,4011	0,2388	1,0979	0,6320	1,7053	0,9715	2,4914	1,4185	3,1881	1,8117	3,8849	2,2050
200	0,05	0,4131	0,2463	1,0926	0,6301	1,6803	0,9586	2,4516	1,3977	3,1310	1,7815	3,8105	2,1653
	0,10	0,4260	0,2545	1,0874	0,6284	1,6544	0,9453	2,4102	1,3762	3,0716	1,7501	3,7330	2,1240
	0,15	0,4399	0,2632	1,0823	0,6267	1,6275	0,9316	2,3673	1,3538	3,0098	1,7173	3,6522	2,0808
	0,20	0,4548	0,2727	1,0774	0,6253	1,5995	0,9173	2,3226	1,3305	2,9452	1,6831	3,5678	2,0357
	0,25	0,4709	0,2830	1,0727	0,6241	1,5705	0,9026	2,2761	1,3062	2,8778	1,6473	3,4795	1,9884
	0,30	0,4885	0,2942	1,0682	0,6231	1,5404	0,8872	2,2276	1,2810	2,8073	1,6099	3,3870	1,9388
	0,00	0,3890	0,2315	1,0687	0,6144	1,7483	0,9974	2,4279	1,3803	3,1075	1,7632	3,7872	2,1461
250	0,05	0,4002	0,2385	1,0623	0,6119	1,7244	0,9852	2,3865	1,3585	3,0486	1,7319	3,7107	2,1052
	0,10	0,4121	0,2461	1,0559	0,6094	1,6997	0,9726	2,3435	1,3365	2,9873	1,6992	3,6311	2,0625
	0,15	0,4248	0,2541	1,0494	0,6069	1,6740	0,9597	2,2987	1,3124	2,9233	1,6652	3,5480	2,0180
	0,20	0,4384	0,2629	1,0430	0,6046	1,6475	0,9463	2,2521	1,2879	2,8566	1,6296	3,4611	1,9713
	0,25	0,4532	0,2723	1,0366	0,6023	1,6200	0,9324	2,2034	1,2624	2,7869	1,5925	3,3703	1,9225
	0,30	0,4691	0,2825	1,0303	0,6003	1,5915	0,9181	2,1527	1,2358	2,7139	1,5536	3,2751	1,8713
	0,00	0,3779	0,2248	1,0416	0,5981	1,7053	0,9715	2,3690	1,3448	3,0328	1,7181	3,6965	2,0915
300	0,05	0,3883	0,2314	1,0343	0,5950	1,6803	0,9586	2,3263	1,3223	2,9723	1,6859	3,6183	2,0495
	0,10	0,3993	0,2384	1,0268	0,5919	1,6544	0,9453	2,2819	1,2988	2,9094	1,6523	3,5370	2,0058
	0,15	0,4110	0,2459	1,0193	0,5887	1,6275	0,9316	2,2357	1,2744	2,8439	1,6173	3,4521	1,9602
	0,20	0,4236	0,2539	1,0116	0,5856	1,5995	0,9173	2,1875	1,2490	2,7754	1,5807	3,3634	1,9124
	0,25	0,4371	0,2626	1,0038	0,5826	1,5705	0,9026	2,1372	1,2225	2,7039	1,5425	3,2706	1,8625
	0,30	0,4516	0,2720	0,9960	0,5796	1,5404	0,8872	2,0847	1,1949	2,6291	1,5025	3,1735	1,8101

		Charge concentre											
		DT = 0		DT = 10		DT = 20		DT = 30		DT = 40		DT = 50	
b2 =ba (mm)	D	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN	CS	CN
50	0	1,1667	0,6957	1,9238	1,1254	2,6809	1,5549	3,438	1,9846	4,1952	2,4141	4,9523	2,8438
	0,05	1,2047	0,7196	1,9457	1,1405	2,6868	1,5614	3,4279	1,9824	4,169	2,4033	4,9101	2,8243
	0,1	1,2458	0,7455	1,9702	1,1575	2,6946	1,5693	3,419	1,9813	4,1436	2,3933	4,868	2,8051
	0,15	1,2903	0,7737	1,9971	1,1759	2,7039	1,5782	3,4108	1,9805	4,1176	2,3828	4,8244	2,7851

	0,2	1,3388	0,8044	2,0272	1,1967	2,7155	1,5888	3,404	1,9812	4,0924	2,3734	4,7808	2,7657
	0,25	1,3918	0,8382	2,0608	1,2199	2,7298	1,6015	3,3988	1,9832	4,068	2,3649	4,737	2,7465
	0,3	1,4504	0,8757	2,099	1,2462	2,7476	1,6166	3,3962	1,9871	4,0447	2,3575	4,6933	2,7279
100	0	1,1293	0,6732	1,8645	1,0897	2,5998	1,5061	3,335	1,9226	4,0703	2,3391	4,8055	2,7556
	0,05	1,1642	0,6953	1,883	1,1026	2,6017	1,5101	3,3204	1,9175	4,0391	2,3249	4,7578	2,7324
	0,1	1,2019	0,7191	1,9033	1,1172	2,6048	1,5152	3,3062	1,9133	4,0078	2,3113	4,7092	2,7094
	0,15	1,2422	0,7447	1,9255	1,1329	2,6088	1,5211	3,2921	1,9092	3,9754	2,2974	4,6586	2,6855
	0,2	1,2861	0,7728	1,9503	1,1503	2,6145	1,5281	3,2788	1,9058	3,943	2,2834	4,6072	2,6611
	0,25	1,334	0,8034	1,978	1,17	2,6222	1,5368	3,2664	1,9035	3,9106	2,2702	4,5548	2,6369
	0,3	1,386	0,8369	2,009	1,1919	2,632	1,5469	3,2549	1,9019	3,8778	2,2567	4,5008	2,6118
150	0	1,9294	0,6526	1,8104	1,057	2,5257	1,4614	3,2409	1,8658	3,9562	2,2703	4,6713	2,6746
	0,05	1,1274	0,6731	1,8257	1,0681	2,524	1,4633	3,2222	1,8583	3,9205	2,2535	4,6188	2,6486
	0,1	1,162	0,6951	1,8425	1,0806	2,523	1,466	3,2035	1,8514	3,8841	2,2368	4,5646	2,6221
	0,15	1,199	0,7188	1,8609	1,094	2,5228	1,4692	3,1847	1,8445	3,8467	2,2197	4,5085	2,595
	0,2	1,2391	0,7444	1,8815	1,109	2,5239	1,4736	3,1664	1,8381	3,8088	2,2026	4,4512	2,5671
	0,25	1,2822	0,7722	1,9042	1,1255	2,526	1,4787	3,1478	1,8319	3,7698	2,1851	4,3916	2,5384
	0,3	1,3293	0,8027	1,9294	1,144	2,5296	1,4852	3,1298	1,8266	3,7299	2,1678	4,3301	2,5092
200	0	1,0639	0,6339	1,7606	1,027	2,4574	1,4204	3,1541	1,8136	3,8509	2,2069	4,5476	2,6001
	0,05	1,0938	0,6528	1,7733	1,0366	2,4528	1,4204	3,1322	1,8042	3,8117	2,1881	4,4912	2,5719
	0,1	1,1258	0,6733	1,7873	1,0474	2,4487	1,4212	3,1101	1,7952	3,7716	2,1693	4,433	2,5431
	0,15	0,6733	0,6952	1,8023	1,0587	2,4448	1,4222	3,0873	1,7858	3,7298	2,1493	4,3722	2,5127
	0,2	1,1966	0,7188	1,8192	1,0714	2,4418	1,4241	3,0645	1,7767	3,6871	2,1293	4,3097	2,4819
	0,25	1,2361	0,7444	1,8378	1,0856	2,4395	1,4267	3,0412	1,7678	3,6429	2,1087	4,2447	2,4499
	0,3	1,2787	0,7722	1,8584	1,1012	2,4382	1,4301	3,0179	1,7591	3,5976	2,088	4,1773	2,4169
250	0	1,0351	0,6165	1,7147	0,9994	2,3943	1,3822	3,0739	1,7652	3,7536	2,1482	4,4332	2,5312
	0,05	1,063	0,6343	1,7251	1,0074	2,3872	1,3809	3,0493	1,7543	3,7114	2,1275	4,3735	2,5009
	0,1	1,0927	0,6534	1,7365	1,0167	2,3803	1,38	3,0241	1,7433	3,668	2,1067	4,3118	2,47
	0,15	1,1242	0,6737	1,7488	1,0265	2,3735	1,3792	2,9981	1,732	3,6227	2,0849	4,2473	2,4375
	0,2	1,158	0,6956	1,7625	1,0372	2,367	1,3788	2,9716	1,7206	3,5761	2,0622	4,1806	2,4039
	0,25	1,1943	0,7192	1,7777	1,0493	2,3611	1,3793	2,9445	1,7093	3,5279	2,0394	4,1113	2,3695
	0,3	1,2333	0,7449	1,7945	1,0628	2,3557	1,3804	2,9169	1,6981	3,478	2,0158	4,0392	2,3335
300	0	1,0084	0,6004	1,672	0,9738	2,3358	1,3471	2,9994	1,7205	3,6632	2,0938	4,3268	2,4671
	0,05	1,0345	0,6172	1,6805	0,9807	2,3265	1,3444	2,9725	1,708	3,6186	2,0718	4,2646	2,4353
	0,1	1,0622	0,635	1,6897	0,9884	2,3172	1,342	2,9447	1,6955	3,5723	2,0489	4,1998	2,4025
	0,15	1,0916	0,654	1,6997	0,9968	2,3079	1,3397	2,9161	1,6826	3,5243	2,0255	4,1325	2,3683
	0,2	1,123	0,6745	1,7109	1,0063	2,2989	1,3379	2,8869	1,6697	3,4748	2,0014	4,0628	2,3332
	0,25	1,1564	0,6965	1,7231	1,0166	2,2899	1,3365	2,8566	1,6565	3,4233	1,9765	3,99	2,2965
	0,3	1,1923	0,7202	1,7367	1,0279	2,2812	1,3356	2,8256	1,6432	3,3699	1,9508	3,9143	2,2585



(a)



(b)

Figure IV.8: L'influence de la largeur (ba) et (b) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en béton armée endommagée ($d = 0.15$) et renforcée par matériaux composites sous un températures de ($DT=30$) : (a) charge répartie, (b) charge concentrée à l'extrémité

IV.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné comment calculer les contraintes d'interface d'une poutre console en béton armée endommagée et renforcée avec matériaux composites, soumise à un chargement uniformément réparti ou concentré à l'extrémité.

En utilisant une nouvelle méthode analytique. Comprendre ces contraintes est essentiel pour comprendre le phénomène de décollement, qui est un mode de rupture fréquent dans les systèmes renforcés.

Les résultats obtenus avec cette méthode ont été confirmés par ceux obtenus avec le modèle de RABAHI [65]. L'étude paramétrique réalisée dans ce travail nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

Haut du formulaire

L'étude paramétrique, menée dans ce travail, nous permet de tirer les conclusions suivantes:

- Les contraintes maximales à l'interface sont les plus élevées au bord de la plaque, puis diminuent rapidement pour les contraintes normales et progressivement pour les contraintes de cisaillement, atteignant toutes deux zéro à mi-travée.
- On observe que lorsque la température augmente, les contraintes d'interface maximales augmentent significativement.
- Les contraintes normales et de cisaillement à l'interface augmentent avec la longueur (a)
- Les contraintes normales et de cisaillement à l'interface diminuent lorsque l'épaisseur de l'adhésif (t_a) augmente.
- Dans le contexte de la charge répartie, on remarque que lorsque la rigidité, notée " E_a ", augmente, les contraintes d'interface maximales demeurent constantes.
- Les contraintes normales et de cisaillement à l'interface diminuent avec l'augmentation de la largeur de l'adhésif (b_a) et de la largeur de la plaque de matériaux composites (b_2).

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

Le but principal de ce travail est de travailler et explorer les méthodes de réhabilitation des structures en béton armé endommagées en utilisant des renforts et/ou des réparations à base de matériaux composites.

Nous examinons les diverses opérations de maintenance nécessaires pour protéger les structures en béton armé contre la corrosion, réparer l'endommagement, et renforcer leur résistance et leur durabilité.

Notre étude se concentre sur l'analyse des contraintes à l'interface entre le béton armé et les matériaux composites dans une console en béton armé renforcée par matériaux composites.

Les résultats de la présente solution ont été validés par ceux obtenus par le modèle de RABAHI. A [65].

- ✓ Les contraintes d'interface maximales (pic) sont observées au bord de la plaque puis diminuent brusquement pour les contraintes d'interface normales et progressivement pour celles du cisaillement, pour atteindre toutes les deux, la valeur de zéro à mi-travée
- ✓ dans les régions exposées à des températures élevées, les contraintes d'interface augmentent, ce qui affecte l'adhérence de la plaque composite au béton
- ✓ Lorsque l'augmentation de la largeur et la longueur de plaque mène à une réduction significative des contraintes d'interface maximale.
- ✓ Les contraintes d'interface sont fortement influencées par l'ampleur de module de Young de l'adhésif.
- ✓ L'augmentation de l'épaisseur de la couche adhésive joue un rôle important dans la réduction des contraintes d'interface normales et de cisaillement.
- ✓ Les contraintes d'interface normales augmentent avec l'épaisseur de la plaque. Aucun changement n'a été remarqué dans la charge répartie

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

- ✓ comportement d'une structure renforcée sous chargement dynamique et en tenant compte l'effet thermique et plusieurs types de renforts (Stratifiés, Sandwichs, nanotubes,.....).
- ✓ Analyse thermomécanique des contraintes d'interface d'une poutre métallique réparée par matériaux composites
- ✓ Analyse thermomécanique des contraintes d'interface d'une poutre console en béton armée endommagée et renforcée par plaque FGM
- ✓ Analyse thermomécanique d'une poutre console métalliques sous différentes charges mécaniques renforcée par plaque FGM.

Référence bibliographique

- [1] Boualleg, S. (2004), "Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires, Mémoire de Magister, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, M'sila, Algerie.
- [2] Andrade, C., Castellote, M., Alonso, C., Gonzalez, C. (2000), "Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion test, part I: comparaison between several methods of calculation", Material and structures, Volume 33, pages 21-28
- [3] Ployaert I C. (2008), "La corrosion des armatures des bétons armés et précontraints", Bulletin de technologie, Febelcem Fédération de l'Industrie Cimentière Belge.
- [4] Groupe de travail AGGC. (2003), "Réhabilitation du Béton Armé Dégradé par la Corrosion", Documents Scientifiques et Techniques.
- [5] Dierkens, M. (2011). Principales agressions et attaques du béton. CETE de Lyon.
- [6] Bricard, C. (2012). Pathologies du béton armé. Journée Technique OA mode doux.
- [7] EL houssain, R, (2004), "Contribution mécanique de dalles en béton armé renforcées par matériaux composites", thèse de doctorat, L'université Claude Bernard- Lyon 1, Lyon, France, page 233
- [8] <http://www.concretecorrosion.net>
- [9] Courard, L., & Bissonnette, B. (2016). Réparation des ouvrages en béton armé-Partie 1: Pathologies et diagnostic. Techniques de l'Ingénieur. Analyse Chimique et Caractérisation
- [10] ESPCI, C. A. (2005). Etude des mécanismes d'adhésion à l'interface résine/ciment en vue de la réparation des ouvrages de génie civil (Doctoral dissertation, INSA, Lyon).
- [11] Baroghel-Bouny, V. (2005). Nouvelle approche de la durabilité du béton. Indicateurs et méthodes. Ed. Techniques Ingénieur
- [12] CALGARO, J.A., LACROIX, R. (dir.), Maintenance et réparation des ponts, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

- [13] Bousmat,A. Belhacen ,M,A,E. «Synthèse bibliographique sur les principales dégradations affectant les constructions en béton armé » . Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem (2020)
- [14] Calgaro, J., Lacroix, R. (1997), "Maintenance et réparation des ponts", Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pages 11-19.
- [15]. Robert, L. (1996), "Déformation Instantanées et différées des bétons à hautes performances", Laboratoire central des ponts et chaussées
- [16] Belhannachi, H. (2009), "Réhabilitation et Renforcement des Poteaux en Béton armé", Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, Faculté des Sciences de L'Ingénieur Département de Génie Civil, Constantine, Algérie
- [17]Aitcin, P. C., Neville, A., & Acker, P. (1998). Les différents types de retrait du béton. Bulletin-Laboratoires des Ponts et Chaussées, 41-52
- [18] Pathologie., (2006). Le retrait des bétons. Laboratoire de la matière. Béton n°6.
- [19] Nguyen, T. H. (2010). Durabilité des réparations à base cimentaire: analyse comparée de l'influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse II-Paul Sabatier)
- [20] Ferrier, E. (1999), "Comportement de l'interface composite-béton sous des sollicitations de fluage thermo stimulé et en fatigue oligocyclique. Application au calcul prévisionnel de la durabilité de poutres BA renforcées", thèse de doctorat, Université Lyon1, Lyon, France
- [21] Kaouadji Mohammed Salim .(2013), Dégradations au niveau de l'usine alzinc constats et recommandations » Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master en Génie Civil,Université de Tlemcen.
- [22] Mesegmine ,B. Houari ,I . « Analyse d'une structure renforcée par les matériaux composites » Mémoire de Master , Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent (2022).
- [23] NGUYEN D. M.« Comportement dynamique de structures non linéaires soumises à des charges mobiles ». Thèse de Doctorat, école nationale des ponts et chaussées, 2002
- [24].GADRI. K.« Contribution à l'étude d'un béton de sable avec fibres et résine destiné pour la réparation mince des structures ». Mémoire de Magister, Université Biskra,2007.

- [25] **Ahmed LAICHAOUI**, « Analyse expérimentale du comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites », mémoire de magister, 2006.
- [26] **C.G.S**, « Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages », Alger – 2^{ème} semestre 1992.
- [27] Badoux, M. (2001), " Vulnérabilité Sismique du Bâti Existant Suisse". Bulletin Technique de la Suisse Romande- Ingénieurs et Architectes Suisses, Volume 12, pages 222- 227.
- [28] Analyse des contraintes d'interface d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque en FGM, , Mémoire de fin d'étude, UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET,2016
- [29] Resse, C., Venaut M. (1981), Projection des Mortiers Béton et Plâtres, Techniques et Applications Bâtiment et TP.
- [30] .Patrick Guiraud. Livre« Solutions béton », Construction Moderne/Annuel Ouvrages d'art ,2011.
- [31] Ould El Hacem Zein El Abidine, «renforcement du béton par les matériaux composites»,Mémoire de Master, 2016.
- [32] Hamelin, P. (2002), "Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites", AM 5 615, Technique de l'ingénieur, Traité Plastiques et Composites, Volume. AM 6.
- [33] Luyckx, J. (1999) "Composites à fibres de carbone dans le génie civil", Technique de l'ingénieur, Traité Plastiques et Composites, AM 5 620.
- [34] benhaddou ,h. Saket,o «Analyse du comportement des poutres continues en béton armé renforcées en flexion par collage externe des plaques en composites»,Mémoire de Master, 2020.
- [35] www.hal.archives-ouvertes.fr consulté le (20 /11/2017).
- [36] <https://bu.umc.edu.dz> consulté le (23 /11/2017)
- [37] J .M .Berthelot Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures .4eme édition, Ed TEC&DOC, Lavoisier, 2005.
- [38] Berthelot J-M. Mécanique des matériaux et structures composites. Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés. 2010.

- [39] R. M. Jones, « Mechanics of Composite Materials, Taylor & Francis », Inc USA, 1999.
- [40] A. Weiss, « Comportement en fatigue des zones de reprises de plis », PhD Thesis, 2010
- [41] M. B. H. Latifa, « Elaboration de matériaux composites biodégradables issus de ressources renouvelables », PhD Thesis, Université de Mostaganem, 2016.
- [42] EL Hadj Babacaly « nouveaux MC (thermo-formable a base fibre de cellulose)Materialchemistry.institut national polytechnique de Grenoble _INPG 2008.
- [43] Koizumi, M. "The concept of FGM, ceramic transactions", Funct Grad Mater, 34, 3–10 ,1993.
- [44] DORLOT J.M, BAILLON J.P, MASOUNAVE J. Des matériaux 2ème édition, Ecole polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, p467,1986.
- [45] Berthelot J.M. (2002), " Matériaux Composites: Comportement Mécanique et Analyse des Structures", TEC et DOC 4ème édition, Le Mans, France
- [46] Laurent Gorent : « Généralités sur les M.C ».Ecole d'ingénieur 2008
- [47] GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES, '' centre d'animation régional en matériaux avancés, 2006.
- [48] G. CHRETIEN. Matériaux composites à matrice organique. Technique et documentation, Edition EYROLLES 1986
- [49] Mallick,P.K. (2007), ‘Fiber-reinforced composites’, Materials, Manufacturing and Design. CRC Press
- [50] Composites for construction, ‘structural design with FRP materials’. NY: John Wiley & Sons; 2006
- [51] Berthelot, J.M (2012), ‘Mécanique des Matériaux et Structures Composites’. Tec & Doc Lavoisier [Calgaro, 1997]: Calgaro, J.Aet Lacroix, R (1997) C’’Maintenance et réparation des ponts ‘’. Presse de l’école nationale des ponts et chaussée
- [52] PERROT. Y, «Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites», thèse de Doctorat, Université de Bretagne Sud, 2006.

- [53] BADOUR ,S .(2018), "Utilisation des matériaux composites pour la réparation parasismique des voiles en béton armé",Mémoire de Master, université ibn khaldoun de tiaret.
- [54] Hollaway L.C., Leeming M.B. (2001), Strengthening of reinforced concrete structures – using externally –bonded FRP composites in structural and civil engineering, Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, First published 1999, reprinted 2001.
- [55] Rahimi H., Hutchinson A. (2001), Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates, ASCE Journal of Composites for Construction, February 2001, pp44-56.
- [56] Saadatmanesh H., Hsani M.R. (1991A), RC beams strengthened with GFRP plates I: experimental study, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.117, No.11, November 1991, pp3417-3433.
- [57] Fanning P.J.,Kelly O. (2001), Ultimate response of RC beams strengthened with CFRP plates, ASCE Journal of composites for construction, May 2001, pp.122 – 127.
- [58] Quantrill R. J., Hollaway L.C., Throne A.M. (1996A), Experimental and analytical investigation of FRP strengthened beam response: part I, Magazine of Concrete research, 1996, 48, No. 177, DEC., pp331-342.
- [59] Grace N.F. (2001), Strengthening of negative moment region of reinforced concrete beams usong carbon fiber-reinforced polymer strips, ACI Structural Journal, May-July 2001, pp347- 358.
- [60] Fanning P.J.,Kelly O. (2001), Ultimate response of RC beams strengthened with CFRP plates, ASCE Journal of composites for construction, May 2001, pp.122 – 127.
- [61] chaded , A, Analyse des contraintes d’interface d’une poutre en béton armé renforcée par une plaque en FGM, , Mémoire de fin d’étude, université ibn khaldoun de tiaret.2016
- [62] BENFAHAT.C, SAFAR.M,< Analyse des contraintes d’interfaces dans une poutre en béton armé endommagé renforcée par une plaque en matériau composite FGM sous précontraint>, Mémoire de master , université ibn khaldoun de tiaret,2017
- [63] ZE YI WU < Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton armé pré-fissurées et renforcées par matériaux composites sous chargement statique et de

fatigue>,THÈSE Pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'ÉCOLE NATIONALE DES
PONTS ET CHAUSSÉES ,2004

[64] Nguyen D.M, Chan T.K and Cheong H.K. 2001 Brittel failure and bond delopment
lenght of CFRP-concrete beams. Journal of Composites forConstruction, 5 (1), 12-17.

[65] RABAHI. A, Daouadji, T.H., Rabia and Tounsi. A, “New proposal for
flexural strengthening of a continuous I-concrete beam using FRP laminate under
thermo-mechanical loading”, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 78, No.
6 (2021) 703-714.