

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Génie Civil et Travaux Publics



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Génie Civil
Domaine : ST
Filière : Génie Civil
Spécialité : Structures
Thème

**Effet thermique sur le renforcement des poutres en béton armé
à l'aide de matériaux composites**

Présenté Par :

- 1) Melle Ahmed Belkacem Fatna
- 2) Melle Belghitri Azza

Devant le jury composé de :

Mme. Lazizi Amina	MCB	UAT.B. B (Ain Temouchent)	Président
Mr. Guenaneche Boucif	Pr	UAT.B. B (Ain Temouchent)	Examinateur
Mr. Amara Khaled	Pr	UAT.B. B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année Universitaire 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Je remercie Allah qui m'aide et m'a donné la patience, la force, le courage et la volonté durant ces longues années d'études.

J'adresse mes sincères remerciements à mon encadrant Monsieur Amara Khaled, à qui j'exprime toute ma reconnaissance, de m'avoir encadré et encouragé tout le long de mon travail. Merci pour sa bonne volonté, sa patience et ses précieux conseils ainsi que pour la pertinence de ses remarques.

Je tiens également à remercier les membres de jury qui ont bien voulu lire et examiner notre travail.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers mes parents, mes frères et mes amis. Leur soutien inconditionnel, leurs encouragements constants et leur amour ont été une force motrice tout au long de mon parcours universitaire. Leurs mots d'encouragement et leur présence réconfortante ont été d'une valeur inestimable dans les moments de doute et de difficultés.

DEDICACES

« وما توفيقى إلا بالله عليه توكلت وإليه أنيب »

Ce projet fin d'étude est dédié à :

Mes chers parents, qui m'ont toujours poussé et motivé dans mes études. Ce travail représente donc l'aboutissement du soutien et des encouragements qu'ils m'ont prodigués tout au long de ma scolarité. Qu'ils en soient remerciés par cette trop modeste dédicace.

A mes sœurs Zahra, Salima et Yamina et mes frères et mes beaux-frères.

A mes amies Fatna, Amení et Bouchera qui n'ont jamais cessée de me soutenir.

Tous les enseignants qui m'ont dirigé vers la porte de la réussite.

Azza

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A mes parents, pour tous leurs sacrifices, leur soutien indéfectible, leur amour inconditionnelle, leurs prières tout au long de mon parcours académique et professionnel, leur confiance en moi a été une source de motivation pour atteindre mes objectifs et réussir cette étape importante dans ma vie.

A mes chères sœurs, pour leur soutien moral et leur conseils précieux tout au long de mes études.

A mes frères, pour leur encouragement.

A ma chère binôme, Azza et mes amies, Amení et Bouchera pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

Tous les enseignants qui m'ont dirigé vers la porte de la réussite.

Fatna

Résumé

La réhabilitation et le renforcement des structures sont parmi les nouvelles techniques de construction. Le placage extérieur en acier est l'une des solutions les plus efficaces. Cependant, un désavantage important réside dans la complexité de manipulation des plaques en acier en raison de leur poids, ainsi que les risques de corrosion. Pour éviter les désavantages de l'acier comme matériau de renforcement, les matériaux composites, souvent désignés sous le nom de polymères renforcés de fibres (PRF), ont émergé comme un éventuel substitut de l'acier dans le domaine du génie civil. Il est plus simple et plus rapide de coller des plaques en PRF que des plaques en acier. Toutefois, l'émergence de ces structures pose de nouveaux défis scientifiques, notamment en ce qui concerne le processus de rupture.

L'objectif de cette étude est d'analyser le comportement d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque en matériau composite, en intégrant l'effet thermique. Ce travail est basé sur un modèle théorique pour estimer les contraintes d'interface normales et de cisaillement développées entre la poutre et le renfort.

Les mots-clés : réhabilitation, renforcement des structures, matériaux composites, polymères renforcés de fibres (PRF), poutre en béton armé, effet thermique, contraintes d'interface.

Abstract

The rehabilitation and reinforcement of structures are among the new construction techniques. Exterior steel cladding is one of the most effective solutions. However, a significant disadvantage lies in the complexity of handling steel plates due to their weight, as well as the risk of corrosion. To avoid the disadvantages of steel as a reinforcing material, composite materials, often referred to as fiber-reinforced polymers (FRP), have emerged as a possible substitute for steel in the field of civil engineering. It is simpler and faster to glue FRP plates than steel plates. However, the emergence of these structures poses new scientific challenges, particularly with regard to the rupture process.

The objective of this study is to analyze the behavior of a reinforced concrete beam reinforced by a composite material plate, integrating the thermal effect. This work is based on a theoretical model to estimate the normal and shear interface stresses developed between the beam and the reinforcement.

Key words: rehabilitation, structural reinforcement, composite materials, fiber reinforced polymers (FRP), reinforced concrete beam, thermal effect, interface stresses.

ملخص

التأهيل والتعزيز الهيكلي للمباني من بين التقنيات الجديدة في مجال البناء. التغطية الفولاذية الخارجية هي أحد الحلول الأكثر فعالية. ومع ذلك، يكمن العيب الرئيسي في التعامل مع الألواح الفولاذية بسبب وزنها، وكذلك خطر التآكل. ولتجنب هذه العيوب، ظهرت المواد المركبة، المعروفة في كثير من الأحيان باسم المواد المعززة بالألياف البوليميرية (FRP)، كبديل محتمل للفولاذ في مجال الهندسة المدنية. إنه أسهل وأسرع لصق الألواح FRP بالمقارنة مع الألواح الفولاذية. ومع ذلك، تطرح ظهور هذه الهياكل تحديات علمية جديدة، خاصة فيما يتعلق بعملية الانهيار.

هدف هذه الدراسة هو تحليل سلوك رافدة خرسانية معززة بلوحة من المواد المركبة، مع دمج التأثير الحراري. تعتمد هذه الدراسة على نموذج نظري لتقدير الإجهادات الطولية والقصية على واجهة التلاقي بين الرافدة والتعزيز.

الكلمات المفتاحية: التأهيل، التعزيز الهيكلي، المواد المركبة، المواد المعززة بالألياف البوليميرية (FRP)، رافدة خرسانية معززة، التأثير الحراري، الإجهادات على واجهة التلاقي.

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES NOTATIONS

INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre I : Généralité sur le renforcement

I.1) Introduction	3
I.2) Origines et causes de dégradation du béton	3
I.2.1) Dégradations d'origine chimique	3
I.2.1.1) La carbonatation	3
I.2.1.2) Alkali-réaction	4
I.2.1.3) Les attaques sulfatiques	5
I.2.1.4) Les attaques par les chlorures	5
I.2.1.5) Les Attaques acides	6
I.2.1.6) Effet de la corrosion.....	6
I.2.2) Dégradations d'origine mécanique.....	7
I.2.2.1) Le Choc.....	7
I.2.2.2) Phénomène d'abrasion et d'érosion.....	8
I.2.2.3) Délamination	9
I.2.2.4) La Fatigue	9
I.2.2.5) L'incendie	10
I.2.3) Les dégradations physiques	10
I.2.3.1) Cycles de gel-dégel.....	10
I.2.3.2) Le retrait.....	11

I.2.3.3) Le tassement.....	12
I.3) Les différentes techniques de renforcement	12
I.3.1) Chemisage en béton armé	12
I.3.2) Chemisage en acier.....	13
I.3.3) Renforcement par des plaques en FRP	14
I.3.5) Béton projeté	16
I.3.6) Précontrainte additionnelle	17
I.4) Conclusion.....	18

Chapitre II : Généralité sur les matériaux composites

II.1) Introduction	19
II.2) Matériaux composites	19
II.3) Constituants des matériaux composites	20
II.3.1) Le renfort	20
II.3.2) La matrice	22
II.3.3) Les charges	24
II.3.4) Les additifs.....	24
II.4) Caractéristiques des matériaux composites.....	24
II.5) Domaines d'applications.....	25
II.6) les avantages des matériaux composites	25
II.7) Conclusion	26

Chapitre III : Analyse des poutres en béton armé renforcées par des plaques

III.1) Introduction.....	27
III.2) Méthode théorique.....	27
III.3) Contraintes d'interface de cisaillement	28
III.4) Contraintes d'interface normales	31
III.5) Analyse des contraintes pour une charge uniformément répartie	33
III.6) La flexion des poutres renforcées par des plaques en FRP	34

III.7) Effet thermique sur le renforcement.....	35
<i>Chapitre IV : Résultats et Analyse</i>	
IV.1) Résultats et Analyse	37
IV.2) Effet de l'épaisseur de la plaque.....	37
IV.3) Effet de l'épaisseur de l'adhésive.....	38
IV.4) Effet thermique	40
IV.5) Conclusion	41
CONCLUSION GENERALE.....	42
ANNEXE	44
REFERANCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	47

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralité sur le renforcement

Figure I.1: Carbonation du béton	4
Figure I.2: Béton dégradé par Alkali-réaction.....	4
Figure I.3: Faïençage résultant d'une attaque sulfatique	5
Figure I.4: Pile de pont attaqué par la corrosion	7
Figure I.5: Poutre de tablier	7
Figure I.6: Intrados des ponts dégradés	8
Figure I.7: Barrière de retenue dégradée.....	8
Figure I.8: Abrasion visible sur les fondations du pont	8
Figure I.9: Fissures polygonales et zones d'érosion par abrasion	8
Figure I.10: Délamination du béton	9
Figure I.11: Fissuration due au gel/dégel	11
Figure I.12: Chemisage en béton armé	13
Figure I.13: Renforcement avec chemise en acier	13
Figure I.14: Poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites	14
Figure I.15: Poutres en BA renforcées par matériaux composites	14
Figure I.16: Dalle renforcé par matériaux composites	15
Figure I.17: Renforcement des murs	15
Figure I.18: Renforcement par grille	16
Figure I.19: Projection par voie sèche	17
Figure I.20: Projection par voie mouillée	17
Figure I.21: Renforcement par précontrainte additionnelle	18

Chapitre II : Généralité sur les matériaux composites

Figure II.1: Le composite	19
Figure II.2: Type de renfort.....	20
Figure II.3: Fibre de verre	21
Figure II.4: Fibre de carbone	21
Figure II.5: Fibre aramide	22
Figure II.6: Types de matrice.	23

Chapitre III : Analyse des poutres en béton armé renforcées par des plaques

Figure III.1: Poutre renforcées par collage d'une plaque..... 27

Figure III.2: Segment différentiel de la poutre renforcées. 28

Figure III.3: Poutre simplement appuyée soumise à une charge uniformément répartie33

Chapitre IV : Résultats et Analyse

Figure IV.1: Effet de l'épaisseur de la plaque sur la contrainte normale..... 38

Figure IV.2: Effet de l'épaisseur de la plaque sur la contrainte de cisaillement. 38

Figure IV.3: Effet de l'épaisseur de l'adhésive sur la contrainte normale 39

Figure IV.4: Effet de l'épaisseur de l'adhésive sur la contrainte de cisaillement..... 39

Figure IV.5: Effet thermique sur la contrainte normale pour une poutre en BA renforcée40

Figure IV.6: Effet thermique sur la contrainte de cisaillement pour une poutre en BA renforcée 40

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre IV : Résultats et Analyse

Tableau IV.1 : Caractéristiques géométriques et mécaniques des matériaux de la poutre renforcées	37
---	----

LISTE DES NOTATIONS

$\sigma(\mathbf{x})$: Contraintes d'interface normales.

$\tau(\mathbf{x})$: Contraintes d'interface de cisaillement.

U : La contrainte de cisaillement.

$\mathbf{u}(\mathbf{x},\mathbf{y})$: Déplacement horizontal de la couche adhésive.

$\mathbf{u}_1(\mathbf{x})$: Déplacement longitudinal à la base de l'adhérent 1.

$\mathbf{u}_2(\mathbf{x})$: Déplacement longitudinal au sommet de l'adhérent 2.

$\mathbf{v}(\mathbf{x},\mathbf{y})$: Déplacement vertical de la couche adhésive.

$\mathbf{v}_1(\mathbf{x})$: Déplacement vertical de l'adhérent 1.

$\mathbf{v}_2(\mathbf{x})$: Déplacement vertical de l'adhérent 2.

G_a : Module de cisaillement de la couche adhésive.

$M1(\mathbf{x})$: Moment de flexion appliqué dans l'adhérent 1.

$M2(\mathbf{x})$: Moment de flexion appliqué dans l'adhérent 2.

$MT(\mathbf{x})$: Moment appliqué à la section totale.

$N1(\mathbf{x})$: Effort normal appliqué dans l'adhérent 1

$N2(\mathbf{x})$: Effort normal appliqué dans l'adhérent 2.

$E1$: Module d'élasticité longitudinal de l'adhérent 1.

$E2$: Module d'élasticité longitudinal de l'adhérent 2.

$(EI)_t$: Rigidité de flexion totale de la section du composite.

$\epsilon 1(\mathbf{x})$: Déformation due aux sollicitations longitudinales dans l'adhérent 1

$\epsilon 2(\mathbf{x})$: Déformation due aux sollicitations longitudinales dans l'adhérent 2.

$w_1(\mathbf{x})$: déformation verticale de la poutre renforcée.

$w_0(\mathbf{x})$: déformation verticale de la zone non renforcée de la poutre.

y_1 : Hauteur entre le bas de l'adhérent 1 et son centre de gravité.

y_2 : Hauteur entre le sommet de l'adhérent 2 et son centre de gravité.

$A1$: Section de l'adhérent 1.

$A2$: Section de l'adhérent 2.

$I1$: Inertie de l'adhérent 1.

$I2$: Inertie de l'adhérent 2.

L : Longueur de la poutre.

L_p : Longueur de la plaque.

$b2$: Largeur de l'adhérent 2.

ta : Epaisseur de l'adhésif.

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

q : Charge uniformément répartie.

α_1 : Coefficient d'expansion thermique de la poutre et le renfort respectivement.

α_2 : Coefficient d'expansion thermique de la poutre et le renfort respectivement.

ΔT : La variation de la température.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les infrastructures en Algérie forment un vaste réseau de routes, de bâtiments et de ponts qui doivent répondre aux besoins économiques et sociaux de la population. L'état actuel de ces infrastructures suscite des inquiétudes, car de nombreux éléments montrent des signes de détérioration significative. Les causes possibles de cette détérioration sont diverses : vieillissement des matériaux, corrosion, augmentation de la charge routière, conception inadaptée, erreurs lors de la construction, ou même une combinaison de ces facteurs. Face à ce défi, deux options se présentent : reconstruire ou réparer. Il est souvent plus économique de renforcer certains éléments structuraux que de procéder à une reconstruction totale de l'ouvrage.

Dans le domaine du génie civil, les matériaux composites sont couramment utilisés pour le renforcement et la réhabilitation des éléments structuraux en béton armé, comme les poutres, les dalles, les colonnes et les murs. Les premières études portant sur l'application de ces nouveaux matériaux dans le domaine du génie civil remontent aux années 1980, mais leur utilisation à grande échelle a véritablement débuté vers les années 1990, initialement à des fins expérimentales avant de s'étendre progressivement à des applications commerciales.

Le renforcement des poutres en béton est généralement réalisé en enveloppant celles-ci avec des matériaux composites fabriqués à partir de fibres de verre, de carbone ou d'aramide. Ces enveloppes améliorent la capacité de confinement du béton, tout en accroissant sa ductilité et sa résistance à la flexion. Les divers types de composites offrent une gamme variée de modules d'élasticité et de rigidités, ce qui peut influencer le comportement flexionnel du béton renforcé en fonction des exigences spécifiques de la structure.

Un matériau composite résulte de la combinaison de deux matériaux différents et complémentaires, ce qui permet d'obtenir un matériau dont les performances dépassent celles de ses composants individuels. Dans le cas du matériau composite étudié, il est constitué de fibres agissant comme renfort et d'une résine jouant le rôle de matrice. Les caractéristiques mécaniques et physiques peuvent être ajustées en modifiant plusieurs paramètres, notamment la nature des composants, leur proportion respective, ainsi que l'orientation des fibres. Les fibres confèrent au matériau composite ses principales propriétés mécaniques telles que la rigidité, la résistance et la dureté. Les fibres de verre, de carbone et d'aramide sont largement utilisées

comme matériaux de renfort dans le domaine de la réhabilitation et du renforcement des structures de ponts ou de bâtiments. Quant à la matrice, elle assure la liaison entre les composants et le transfert des contraintes à travers tout le matériau composite, tout en offrant une protection contre les agressions environnementales.

L'objectif de notre mémoire est d'analyser les contraintes d'interfaces et l'impact de l'effet thermique sur les poutres en béton armé renforcées par les matériaux composites.

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

❖ L'aspect théorique comprend deux chapitres :

Le premier chapitre : Une généralité sur les renforcements.

Le deuxième chapitre : Définir d'une manière générale les matériaux composites ainsi que leurs domaines d'utilisation.

❖ L'aspect analytique est scindé en deux chapitres :

Le troisième chapitre : L'analyse des poutres en béton armé renforcées par des plaques.

Le quatrième chapitre : Analyser, valider et commenter les résultats trouvés.

En fin, ce travail se terminer par une conclusion générale.

CHAPITRE I :
GENERALITE SUR LE
RENFORCEMENT

I.1) Introduction :

Le renforcement de structure en béton est généralement consécutif à une modification d'ordre structurel qui peut être soit liée à un changement de destination de l'ouvrage (augmentation des charges d'exploitation) soit à un affaiblissement de la structure (création de trémie ou incendie). Il peut être réalisé par la technique du béton projeté par voie sèche ou par la mise en œuvre de matériaux composites de dernière génération. Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier (augmentation de la ductilité, de la résistance) d'une construction pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre des sollicitations. Un renforcement peut être associé à une réparation. [1]

I.2) Origines et causes de dégradation du béton :

La durabilité des ouvrages en béton armé dépend de leur comportement face aux conditions climatiques et environnementales qui existent dans les milieux où ils sont construits. Ces ouvrages sont souvent soumis à un processus permanent des dégradations physiques, mécaniques et chimiques sous l'effet des agressions extérieures.

La dégradation du béton est sa perte de performance elle se manifeste par détérioration, déformation ou changement de ces propriétés. La fissure constitue le signe d'une première manifestation apparente de dégradation possible, comme elle peut prendre l'aspect des éclats ou couleurs de rouille. [2]

I.2.1) Dégradations d'origine chimique :

I.2.1.1) La carbonatation :

La carbonatation est le résultat de la réaction chimique entre le dioxyde de carbone CO_2 présent dans l'air et les constituants de la pâte de ciment hydratée susceptibles de réagir telle que : la portlandite $Ca(OH)_2$ et les silicates de calcium hydratés (CSH). Cette réaction réduit donc le pH du béton de 13 à 9 et neutralise progressivement l'alcalinité du béton. Lorsque le front de carbonatation parvient aux armatures, elles se corrodent et perdent beaucoup en résistance. Des défauts esthétiques se présentent au début (tache de rouille) qui peut conduire à de gros désordres structurels tel que la ruine de l'ouvrage quand le phénomène se généralise. [3]



Figure I.1: Carbonation du béton. [4]

I.2.1.2) Alkali-réaction :

L'alkali-réaction ou la réaction alcali-granulat (**RAG**) est une réaction chimique entre des granulats réactifs et les alcalins contenus dans le ciment. Cette réaction produit une expansion à l'intérieur du béton qui va créer des tensions, puis des gonflements et des fissures.

Il existe trois types de réactions alcali-granulats : la réaction alcali-silice, la réaction alcali-silicate ainsi que la réaction alcali-carbonate.

- 1) **Les réactions alcali-carbonate** : Cette réaction est créée avec des granulats composés de dolomite argileuse et de calcaire à grains fins avec inclusion de minéraux argileux, le mécanisme de gonflement est lié à l'absorption d'eau des argiles.
- 2) **La réaction alcali-silicate** : elle est semblable à la réaction alcali-silice mais de cinétique plus lente, elle est très rare et va se produire en général quelques décennies après la fabrication de l'élément en béton.
- 3) **La réaction alcali-silice** : il s'agit le type le plus courant des réactions qui se produit en général dans un délai de quelques années après la fabrication de l'élément en béton. [5]



Figure I.2: Béton dégradé par Alkali-réaction. [5]

I.2.1.3) Les attaques sulfatiques :

Les phénomènes à l'origine de l'attaque sulfatique ne sont pas parfaitement bien connus ni maîtrisés.

L'attaque sulfatique est associée à la précipitation de produits sulfatés secondaires, d'une expansion importante et de la détérioration chimio-mécanique (modifications des propriétés de transport de la porosité, fissures, perte de résistance et de cohésion). Ceci peut conduire à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé (type et rapport Eau/Ciment). On distingue deux types des réactions sulfatiques :

- 1) **L'attaque sulfatique interne** : Il qui fait intervenir des sulfates déjà présents dans les constituants de béton.
- 2) **L'attaque sulfatique externe** : Il qui se produit dès lors que les conditions externes sont réunies et au contact direct avec une source de sulfate (sols, eaux, atmosphère). [5]



Figure I.3: Faiëncage résultant d'une attaque sulfatique. [5]

I.2.1.4) Les attaques par les chlorures :

Les ions chlorures peuvent attaquer le béton de l'intérieur, pendant le processus de gâchage, ou de l'extérieur en pénétrant par les fissures ou le réseau poreux du béton pour aller corroder les aciers. Les ions chlorures de sources internes existent en raison de l'utilisation des éléments suivants dans le béton.

- ❖ L'eau de mer.
- ❖ Certains granulats qui contiennent des chlorures.
- ❖ Les additions qui ont une teneur en chlorure plus élevée que celle définie dans la spécification normative.

- ❖ L'eau de gâchage à une teneur en chlorure plus élevée que celle autorisée par les normes.

Les ions chlorures de sources externes peuvent se propager à l'intérieur de béton dans les cas suivants :

- ❖ Bétons exposés à des embruns de l'eau de mer ou une exposition continue à l'eau salée.
- ❖ Utilisation du sel de déverglace.
- ❖ Présence des chlorures dans certains sols.

La dégradation se manifeste par l'apparition de rouille à la surface du béton sous forme de taches non esthétiques, réduction de la section des aciers résistants ainsi que la fissuration ou l'éclatement local du béton. [3]

I.2.1.5) Les Attaques acides :

Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment (la phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé). Il peut donc présenter une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries agroalimentaires ou industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures. L'action des acides (comme la substance agressive) sur le béton durci (comme la substance réactive) traduit par la transmutation des composés de calcium (Hydroxyde de calcium hydraté de calcium, le silicate et d'aluminate de calcium hydraté) aux sels de calcium. En raison de ces réactions, la structure du ciment durci est détruite. Le taux de réaction des différents acides avec du béton n'est pas déterminée par l'agressivité de l'acide, mais par la solubilité du sel de calcium qui en résulte. [3]

I.2.1.6) Effet de la corrosion :

La corrosion est une réaction chimique ou électrochimique entre un matériau, généralement un métal, et son environnement qui entraîne une dégradation du matériau et de ses propriétés. Ces phénomènes touchent tous les types d'ouvrages en béton armé :

- ❖ **Le bâtiment :** balcons, pignons dans toutes les atmosphères, en milieu urbain, ou maritime, parkings souterrains du fait de la pollution par les agents de déverglage, les bâtiments industriels : poteaux, poutres et dalles soumis assez souvent à des expositions d'agents chimiques.



Figure I.4: Pile de pont attaqué par la corrosion. [6]

- ❖ **Les ponts et ouvrages d'art :** les zones les plus sensibles sont les tabliers, les appuis et les équipements de tablier pour lesquels l'influence des sels de déverglaçage est importante. [1]



Figure I.5: Poutre de tablier. [6]

I.2.2) Dégradations d'origine mécanique :

I.2.2.1) Le Choc :

Les désordres induits par l'exploitation d'un ouvrage constituent une cause non négligeable de dégradation du béton. Il s'agit le plus souvent d'action accidentelle de type mécanique qui se concrétise par des chocs. Les chocs les plus fréquents sont ceux du poids lourd hors gabarit contre l'intrados des ponts, les chocs des bateaux ou d'objets flottants contre les piles en rivière, ainsi que les chocs de véhicules contre les barrières de retenue. Ces chocs peuvent créer des épaufrures, des éclats importants de béton, voir même des ruptures d'acier. [3]



Figure I.6: Intrados des ponts dégradés. [4] **Figure I.7:** Barrière de retenue dégradée. [4]

I.2.2.2) Phénomène d'abrasion et d'érosion :

Concerne principalement les piles de ponts en maçonnerie soumises à l'action du courant ou qui subissent des chocs de corps flottants.

- ❖ **L'abrasion :** C'est de la surface par suite de frottement répété et des tempêtes dans les zones dessertes qui peuvent conduire à l'abrasion des matériaux. [7]



Figure I.8 : Abrasion visible sur les fondations du pont. [7]

- ❖ **L'érosion :** Les ouvrages en site fluvial ou maritime sont sujets à l'érosion due au charriage d'éléments solides soit du fait d'un fort courant ou sous l'action des vagues pour les ouvrages côtiers. [7]



Figure I.9: Fissures polygonales et zones d'érosion par abrasion. [7]

I.2.2.3) Délamination :

L'air et l'eau en trappés sous le mortier de surface provoquent une délamination de la surface de la dalle de béton variant de quelques centimètres à quelques mètres carrés.

L'épaisseur de délamination de la dalle peut varier de 3 à 5mm. Elle est apparente lorsque le béton est durci et que la surface se détériore sous l'action de la circulation. Elle aboutit à la chute de plaque de béton et la création de trous dans le tablier de pont. [7]



Figure I.10: Délamination du béton. [7]

I.2.2.4) La Fatigue :

La fatigue d'un élément signifie son endommagement sous l'effet d'efforts répétés ou cycliques. Alors qu'il est conçu pour résister à des efforts donnés, l'application répétée d'efforts plus faibles peut provoquer sa rupture. Les endommagements par fatigue se traduisent par une dégradation de l'adhérence entre le béton et les armatures entraînant l'apparition d'une fissuration pouvant affecter la durée de vie de l'ouvrage, voire des déformations irréversibles sous l'effet des charges de service. Ils peuvent entraîner éventuellement la rupture quand l'assemblage atteint sa limite d'endurance. Le degré d'endommagement dépend de nombreux facteurs comme :

- ❖ L'amplitude de la sollicitation (le nombre et l'intensité des cycles de chargement ou déformation imposée).
- ❖ La variabilité des charges appliquées.
- ❖ Le degré de fissuration entraînant une modification des propriétés du béton.

On rencontre deux types principaux de fissurations d'origine mécanique :

- ❖ Les fissures verticales sont liées à un ferrailage insuffisant dans les zones les plus sollicitées :

- 1) En partie inférieure à mi- portée.
- 2) En partie supérieure aux appuis.

Les fissures à 45° (fissures d'effort tranchant) sont causées par un nombre insuffisant de cadres aux extrémités. L'origine de ces désordres peut être liée à une erreur de dimensionnement, à un défaut d'exécution (erreur dans le ferrailage, décoffrage prématuré) ou à une utilisation anormale (surcharge d'exploitation). Ces fissurations ont pour conséquences l'altération de la rigidité de la structure porteuse et la formation d'articulations non désirées ce qui provoque un changement de flux de forces et du système statique. Ces fissures dues à des dégradations mécaniques sont à distinguer des autres fissurations ayant pour origine des pathologies. [3]

I.2.2.5) L'incendie :

Les dégradations par incendie sont heureusement rares pour les ponts, et affectent davantage les bâtiments. L'incendie a pour effet thermique d'élever rapidement la température au sein du béton, la vaporisation brutale de l'eau se combine à une altération interne du béton pour créer des microfissures, des écaillages, avec éclatements et des disparitions de béton.

On trouve aussi d'autres causes de dégradation de béton qui sont liées à des événements extérieurs comme : Les séismes, les inondations, les mouvements de fondations, le vent, et les surcharges. [4]

I.2.3) Les dégradations physiques :

I.2.3.1) Cycles de gel-dégel :

Le risque de détérioration par le gel d'un béton est particulièrement plus élevé lorsque que son degré de saturation en eau est important. C'est notamment le cas des parties d'ouvrages non protégées des intempéries et en contact direct avec des eaux salées. Ces dégradations peuvent être amplifiées si le béton est mal conçu et elles se manifestent sous deux formes :

- ❖ Détérioration par fissuration interne.
- ❖ Détérioration par l'écaillage des surfaces en présence de sels fondants.

Ces deux formes de dégradation peuvent se produire simultanément ou de manière indépendante et elles peuvent affecter la durabilité de la structure.

- ❖ **Détérioration par fissuration interne :**

La fissuration interne peut se propager dans toute la masse de béton, mal conçu et soumise à de nombreux cycles de gel dégel.

Cette dégradation se manifeste par l'apparition d'une intense microfissuration du béton non seulement en surface mais aussi à l'intérieur de la masse de béton soumise au gel.

La fissuration interne diminue la performance du béton en réduisant considérablement ses caractéristiques mécaniques (résistances à la compression et à la traction, module élastique) et son imperméabilité. Par exemple, un béton fortement attaqué par le gel interne peut affaiblir énormément sa cohésion.

❖ **Détérioration par l'écaillage :**

L'écaillage de surface est un mode de dégradation qui n'affecte que les surfaces de béton fortement exposées aux cycles de gel-dégel et des sels fondants. Il se manifeste par le décollement progressif de petites particules de pâte qui ont souvent la forme de petites écailles. En plus d'une dégradation esthétique de l'ouvrage, ce phénomène augmente sensiblement la perméabilité de surface et réduit l'épaisseur de recouvrement des aciers. Il favorise ainsi l'intrusion de substance délétère au sein du matériau et augmente le risque de corrosion des armatures. L'écaillage de surface est pratiquement inexistant lorsque l'exposition au gel-dégel se fait en absence des sels fondants. [3]



Figure I.11: Fissuration due au gel/dégel. [8]

I.2.3.2) Le retrait :

Le béton peut subir des dégradations dont la cause est l'existence d'un retrait mal maîtrisé. Le retrait est en effet un phénomène physico- chimique qui existe de façon systématique au sein d'un béton et qui se développe sous diverses formes depuis la prise du béton jusqu'à son vieillissement. Ce qui engendre en fissuration superficielle de formes et direction quelconque, on a différents types de fissures de retraits dont deux types sont :

❖ **Retrait plastique :** Causé par un manque d'humidité durant le mûrissement du béton.

- ❖ **Retrait du séchage :** La plus importante cause de fissuration du béton est le retrait au séchage sous contrainte. La perte humidité par la perte d'eau durant le mûrissement cause le retrait de celui-ci de près de 1% par unité de longueur et, par conséquent, création de contraintes de traction. Si Le béton est libre de se déformer, aucune fissuration n'apparaît. Mais la combinaison des deux phénomènes, retrait et contrainte, provoque la fissuration du béton si la résistance à la traction de ce dernier est dépassée. [4]

I.2.3.3) Le tassement :

On trouve aussi le tassement localisé des surfaces de coulage causé par la présence d'armature dans le béton engendrant ainsi des vides ou des fissures au voisinage de ces armatures. Une augmentation du diamètre ou un mauvais compactage favorisera l'apparition des fissures. [4]

I.3) Les différentes techniques de renforcement :

I.3.1) Chemisage en béton armé :

Le chemisage en béton armé résulte une augmentation de la section du poteau et cela se fait par l'addition des armatures longitudinales et transversales à l'élément déjà existant et puis la mise en place d'un nouveau béton d'enrobage. Cette technique est appliquée pour les poteaux afin d'assurer les besoins suivants :

- ❖ Augmentation de la portance.
- ❖ Augmentation de la résistance en flexion et au cisaillement.
- ❖ Augmentation de la capacité de déformation.

Une préparation de la surface de l'élément en béton armé est demandée, pour cela un décaissement est nécessaire dans le béton pour une amélioration de la transmission des efforts, le traitement de la surface est fait avec une couche primaire de résine époxy. Si le renforcement est avec des armatures, cela conduit à une mise en place des armatures puis la réalisation de bétonnage par coulage ou pompage est faite. [9]



Figure I.12: Chemisage en béton armé. [9]

I.3.2) Chemisage en acier :

Le chemisage en acier des poteaux de section rectangulaire et circulaires résulte à une amélioration de la résistance sismique des colonnes. La démonstration de l'efficacité du chemisage en acier a été visible par les recherches expérimentales et encore par l'observation de son efficacité sur le terrain durant le séisme de Northbridge en 1994.

Toutefois, Cette technique de renforcement est couteuse et exige une main d'œuvre professionnelle. Compte tenu de cout et de la grande efficacité du chemisage en acier, cette technique pourrait éventuellement être appliquée dans les installations industrielles qui possèdent un nombre limité de colonnes nécessitant un renforcement. Mais, dans le cas de plusieurs poteaux ou des bâtiments types doivent être renforcés, le chemisage en acier s'avère trop coteaux.

Dans le cas des poteaux rectangulaires, le chemisage en acier soit rectangulaire ou elliptique peut être exécuté. Toutefois, les recherches ont démontré que les chemises elliptiques sont plus efficaces que les chemises rectangulaires. [9]

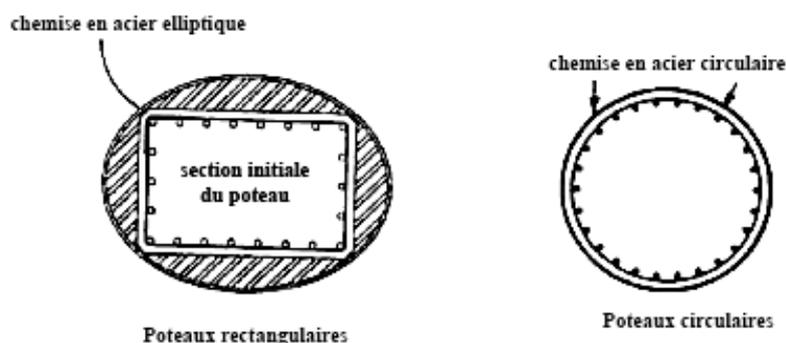


Figure I.13: Renforcement avec chemise en acier. [9]

I.3.3) Renforcement par des plaques en FRP :

a) Renforcement des poteaux :

L'utilisation d'une enveloppe formée de feuilles de FRP autour de la colonne permet non seulement d'assurer une protection supplémentaire, mais aussi d'améliorer la résistance en compression par l'effet du confinement produit par les fibres du composite en plus d'une augmentation de ductilité très significative comparativement à la colonne sans composite.

[10]



Figure I.14: Poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites. [10]

b) Renforcement des poutres :

On peut effectuer un renforcement en flexion en collant les bandes sur la surface tendue de la poutre, et le renforcement en cisaillement peut être apporté par le collage des bandes sur les parois de ces mêmes poutres.



Figure I.15: Poutres en BA renforcées par matériaux composites. [10]

c) Renforcement des dalles :

L'utilisation de composites en bandes peut aussi améliorer la résistance en flexion de dalle en béton armé.



Figure I.16: Dalle renforcé par matériaux composites. [10]

d) Renforcement des murs :

Seulement quelques cas d'application de matériaux composites destinés au renforcement de murs ont été publiés. Le plus documenté d'entre eux concerne un immeuble à appartements de six étages à Zurich, en Suisse (Steiner, 1996). Étant donné que le bâtiment a été construit en 1930 et converti en bâtiment à bureaux avec certaines modifications au niveau de son système de résistance latérale, le système structural a donc été réévalué. Parmi ces changements, des murs en maçonnerie non renforcés conçus pour les charges sismiques ont été enlevés, et ceux restants devaient prendre une charge beaucoup plus grande. L'utilisation des matériaux composites s'avérait donc très utile. On a collé des plaques de fibres de carbone en forme de X pour chacun des étages. Un système d'ancrage avec des tiges d'acier a servi pour améliorer l'adhésion entre les fibres et le mur. Avec les composites, la ductilité du mur a été augmentée à un coût relativement faible et dans des délais très raisonnables.



Figure I.17: Renforcement des murs. [10]

e) Renforcement par grille :

Nous étudions dans ce projet l'incidence que peut avoir la qualité de la résine de protection de la fibre de verre. Ainsi toutes les grilles ont une ouverture de maille de 40mm x 40 mm entraxe et sont associées à un même léger non-tissé de polyester. Deux types de

résistances mécaniques (50 et 100 K N/m à la rupture) et deux types de résines sont retenus. L'influence de ces paramètres sur l'endommagement à la mise en œuvre, la qualité du collage et en final l'apport structurel sera étudiée.

Ces grilles ont comme référence une grille qui a fait ses preuves et qui est utilisée depuis plus de 10ans. [10]

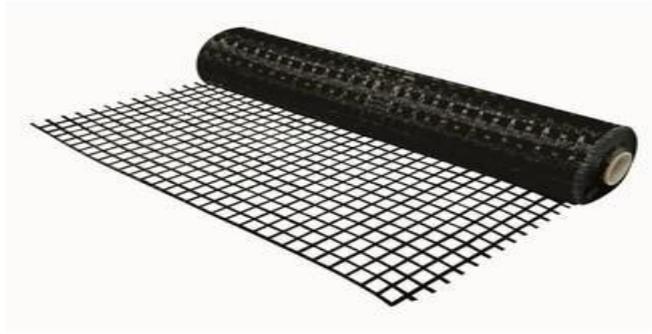


Figure I.18: Renforcement par grille. [10]

I.3.5) Béton projeté :

Le béton projeté est un béton mis en œuvre par refoulement dans une conduite et projeté sur une paroi par un jet d'air comprimé. Cette technique de réparation était très couramment employée car particulièrement bien adaptée à la réparation des voûtes et tunnels ou des murs en béton armé. Elle permet de réaliser aussi bien des réparations superficielles, comme la réparation d'un parement en béton présentant de légères épaufrures, que des réparations ou des renforcements de structures, en disposant de nouvelles armatures à la structure. Dans ce cas, le béton reconstitue non seulement la géométrie de la construction mais aussi, il joue également le rôle confié au béton dans l'association acier / béton armé. Les étapes importantes avant la projection du béton sont la mise en état du support (sablage, brossage des armatures,), la mise en disposition et l'ancrage des armatures ajoutées et enfin la mise en place des coffrages. [10]

Il existe deux techniques de projection, qui se distinguent essentiellement par le moment d'introduction de l'eau de gâchage :

- ❖ **Technique par voie sèche :** introduction lors de la projection du béton.

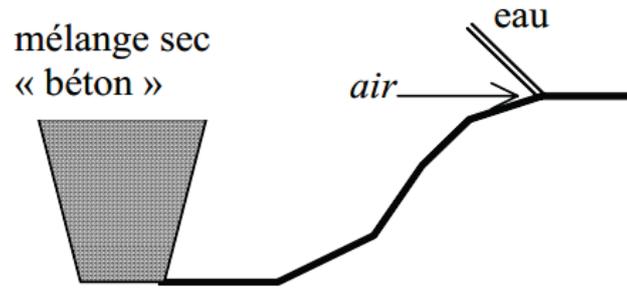


Figure I.19: Projection par voie sèche. [9]

- ❖ **Technique par voie mouillée :** introduction lors du malaxage en centrale à béton.

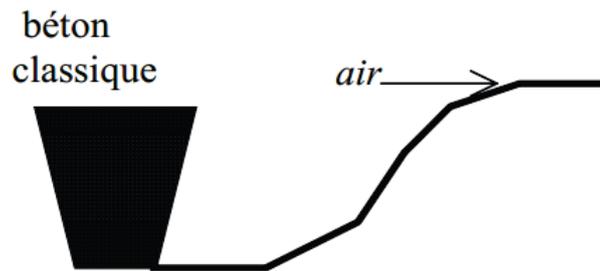


Figure I.20: Projection par voie mouillée. [9]

I.3.6) Précontrainte supplémentaire :

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés graissés généralement disposés à l'extérieur du béton. La précontrainte supplémentaire va introduire dans la structure des sollicitations complémentaires, qui vont compenser les défauts de dimensionnement ou de conception ou des efforts supplémentaires, que doit supporter la structure suite à des modifications des conditions de chargement ou d'utilisation.

Les nouveaux câbles ou torons doivent, en apportant de la compression, décompresser les zones tendues, sans ajouter d'excès de contraintes dans les zones comprimées. Cette technique permet :

- ❖ Soit d'améliorer la pérennité des ouvrages
- ❖ Soit de renforcer des ouvrages en béton (en particulier des ouvrages en béton précontraint dont les câbles présentent des problèmes de corrosion ou de ruptures de torons ou d'ancrages ou qui ont fait l'objet lors de leur dimensionnement d'une déprise en compte de lois de fluage mal adaptées).

- ❖ Soit d'augmenter la capacité structurale des ouvrages (augmentation des charges ou des trafics, modification des fonctionnalités ou de convois exceptionnels).

Elle peut s'appliquer à tous types de structures existantes en béton armé ou en béton précontraint. La précontrainte extérieure est le plus souvent constituée de câbles fixés à des bossages ancrés à la structure par des barres de précontrainte. Les câbles sont protégés par une gaine en polyéthylène injectée à la cire pétrolière. La technique des torons graissés est beaucoup plus simple d'utilisation car elle permet la mise en tension toron par toron à l'aide de petits vérins. [10]

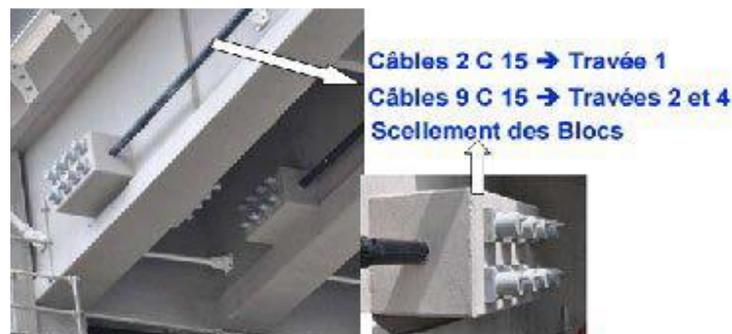


Figure I.21: Renforcement par précontrainte additionnelle.[10]

I.4) Conclusion :

Les matériaux composites offrent une remarquable souplesse en s'ajustant aisément aux formes géométriques complexes des éléments renforcés. Leur légèreté par rapport aux aciers facilite leur manipulation, leur transport et leur mise en œuvre sur site. En outre, leurs propriétés mécaniques et physico-chimiques supérieures par rapport à d'autres méthodes de renforcement les rendent particulièrement adaptés à l'utilisation dans la réhabilitation des structures en béton armé.

CHAPITRE II :

GENERALITE SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

II.1) Introduction :

Il existe différentes familles de matériaux : les métaux, les polymères, les céramiques... Les matériaux composites peuvent être une combinaison de ces trois familles, ils ne sont pas une nouveauté, ils ont été utilisés par l'homme depuis très longtemps, citons par exemple le bois, le béton. [11]

Des processus nouveaux de conception, d'industrialisation et de fabrication permettent d'étendre les possibilités techniques, et de mieux satisfaire des besoins parfois contradictoires (poids, fonctions...) auxquels les matériaux homogènes classiques répondent difficilement. En effet, les matériaux composites ont un comportement particulier, et ceci est dû essentiellement à deux facteurs. Le premier facteur résulte du comportement anisotrope du matériau utilisé dans la couche élémentaire : contrairement aux matériaux isotropes, les matériaux composites sont peu rigides en cisaillement. Le deuxième facteur dérive de la stratification qui consiste en l'empilement de plusieurs couches, ce qui favorise l'effet de cisaillement, et particulièrement du cisaillement transversal. [12]

II.2) Matériaux composites :

Un composite est un matériau hétérogène, formé d'au moins deux constituants qui occupent des phases différentes. Ces constituants sont disposés selon une organisation géométrique, qui confère au composite des propriétés supérieures à celles des constituants pris séparément. Il est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. [11]

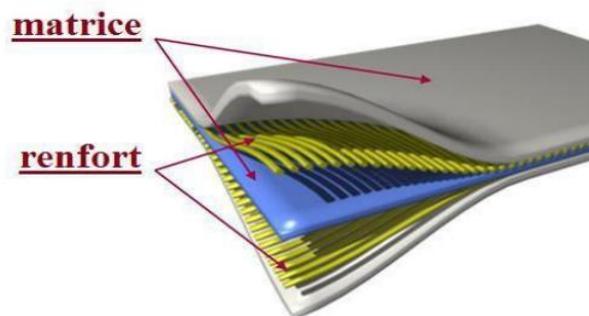


Figure II.1: Le composite. [13]

Les matériaux composites disposent d'éventualités importantes par rapport aux matériaux traditionnels. Ils possèdent de nombreux avantages fonctionnels :

- ❖ Légèreté.
- ❖ Résistance mécanique et chimique.
- ❖ Maintenance réduite.
- ❖ Liberté de forme et une bonne isolation électrique.

II.3) Constituants des matériaux composites :

II.3.1) Le renfort :

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique à la traction et la rigidité des matériaux composites, un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée se présentent sous forme filamenteuse (des fibres organiques ou inorganiques). [14]

- ❖ Différentes natures de renfort :

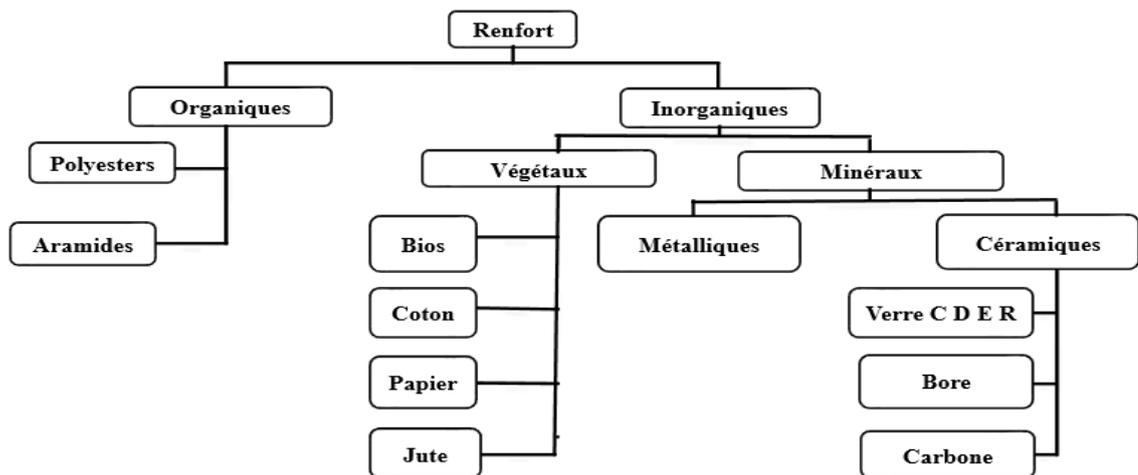


Figure II.2: Type de renfort.

II.3.1.1) Fibres de verre :

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance-prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites. [15]



Figure II.3: Fibre de verre. [16]

II.3.1.2) Fibres de carbone :

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres précurseurs utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur.

Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitisation. Le brai qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille est également utilisé pour produire des fibres de carbone.

Quelques exemples de fibres de carbone classiquement rencontrées : T_{300} , T_{800} ,

MR_{40} , TR_{50} , IM_6 , IM_7 , GY , M_{55J} . [15]



Figure II.4: Fibre de carbone. [16]

II.3.1.3) Fibres aramides :

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des enzymages des fibres peuvent être utilisés. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides. Des renforts hybrides de type verre-kevlar ou carbone-kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ski, raquette de tennis).

Quelques exemples de fibres aramides : KEVLAR (Dupont de Nemours, USA), TWARON (Akzo, Allemagne-Hollande), TECHNORA (Teijin, Japon). [15]



Figure II.5: Fibre aramide. [16]

II.3.1.4) Fibres céramiques :

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions. Quelques exemples de fibres céramiques : [15]

- ❖ Fibres de Carbure de Silicium.
- ❖ Fibres de Bore.
- ❖ Fibres de Bore carbure de silicium.

II.3.2) La matrice :

La matrice est l'élément qui lie et maintient les fibres. Elle répartie les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres. [14]

❖ Différentes natures de la matrice :

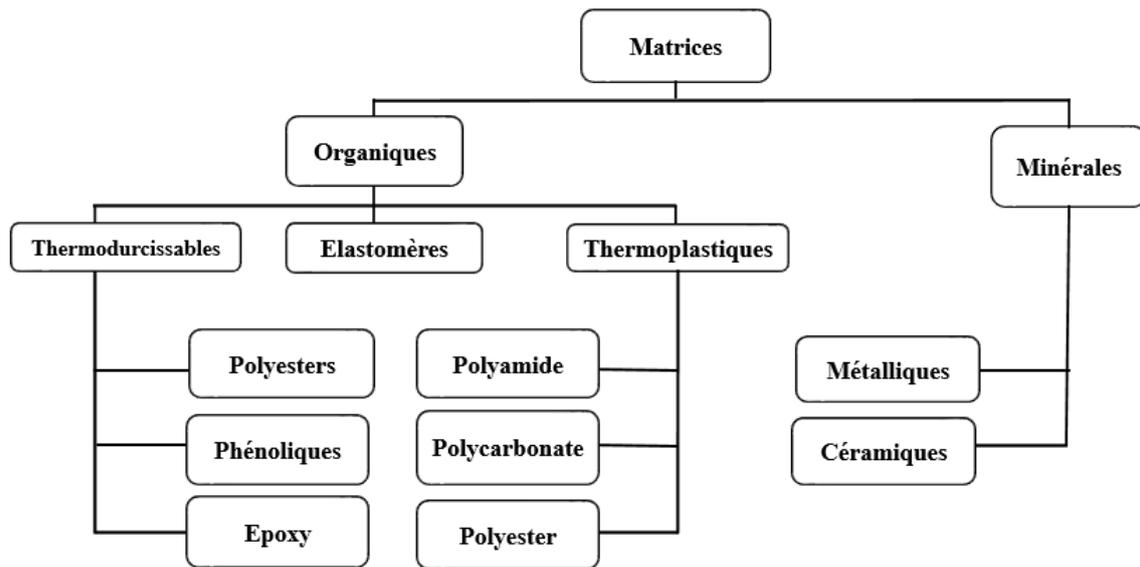


Figure II.6: Types de matrice.

Dans le cas de CMO les principales matrices utilisées sont :

❖ Résines thermodurcissables :

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants.

- Les résines polyesters insaturées.
- Les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, furaniques).
- Les résines époxydes sont des résines thermodurcissables.

❖ Résines thermoplastiques :

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Les divers thermoplastiques peuvent être renforcés par des fibres et font partie alors des matériaux composites. Cependant, dans le domaine des composites, les résines

thermoplastiques ont un développement limité, du fait de la nécessité de faire appel à des transformations à hautes températures de produits solides. [14]

II.3.3) Les charges :

L'objet de la charge renforçant est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine, ou diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines. En générales ces charges sont des microbilles ou des particules (poudre). Les principales charges utilisées sont :

- ❖ Microbille en (verre, carbone, époxyde, phénolique, polystyrène, etc. ...).
- ❖ Des poudres ou paillettes métalliques : (cuivre, fer, aluminium, etc. ...).
- ❖ Des particules de carbone (noir de carbone). [14]

II.3.4) Les additifs :

Ils sont nécessaires pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice et de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés. Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme : [14]

- ❖ Lubrifiants et agents de démoulage.
- ❖ Pigments et colorants.
- ❖ Agents anti-retraits.
- ❖ Agents anti-ultraviolets.
- ❖ Accélérateur.
- ❖ Catalyseur.

II.4) Caractéristiques des matériaux composites :

Les propriétés des matériaux composites dépendent de beaucoup de facteurs et sont différentes selon les divers types de matériaux composites. Ces propriétés résultent : [14]

- ❖ Des propriétés, de la nature et de la quantité des matériaux constitutifs.
- ❖ Des constituants, de la géométrie et de la distribution du renfort.
- ❖ De leurs interactions, de la nature de l'interface matrice-renfort, etc.

Les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont :

- ❖ Le gain de masse,
- ❖ La bonne tenue en fatigue (durée de vie augmentée),
- ❖ L'absence de corrosion,
- ❖ L'absence de plasticité (leur limite élastique correspond à la limite de rupture)

- ❖ Le vieillissement sous l'action de l'humidité et de la chaleur
- ❖ L'insensibilités à certains produits chimiques courants (solvants, peinture, huiles, pétroles...)
- ❖ Tenue aux impacts et aux chocs très moyenne, - très forte anisotropie.

II.5) Domaines d'applications :

Les excellentes performances mécaniques des matériaux composites fibres résine en termes de caractéristiques spécifiques en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les structures. En outre, l'intérêt de ces matériaux réside dans leur anisotropie aisément contrôlable par le concepteur qui peut ainsi ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures. Ainsi l'immense avantage des matériaux composites est de pouvoir être optimisés pour chaque application : on peut placer le renfort exactement où il est nécessaire. Cette optimisation résulte en une grande performance de ces matériaux, qui sont souvent de loin les plus légers pour une résistance mécanique spécifiée. Cependant ils restent très chers à fabriquer ! D'où leurs domaines d'application : [14]

- ❖ Électricité et électronique.
- ❖ Bâtiment et travaux publics.
- ❖ Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire).
- ❖ Santé (instrumentation médicale).
- ❖ Sports et loisirs (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf, club de golf, ...).

II.6) les avantages des matériaux composites :

Le principal intérêt de l'utilisation des matériaux composites provient de ses excellentes caractéristiques. Ils disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : [14]

- ❖ Légèreté.
- ❖ Grande résistance à la fatigue.
- ❖ Liberté de formes.
- ❖ Maintenance réduite.
- ❖ Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion

- ❖ Insensibles aux produits chimiques sauf les décapants de peinture qui attaquent les résines.
- ❖ Permettent également de modifier certaines propriétés physiques comme le comportement thermique, la résistance à l'abrasion ou les propriétés électriques.

II.7) Conclusion :

En conclusion de ce chapitre, nous avons exploré les matériaux composites, leur diversité, et leurs avantages. Ces matériaux, formés par la combinaison de plusieurs constituants, offrent des performances supérieures, notamment légèreté, résistance mécanique, et liberté de forme. Les renforts, tels que les fibres de verre, de carbone, et d'aramide, ainsi que les matrices, jouent des rôles cruciaux. Les charges et additifs contribuent également aux propriétés finales. Les caractéristiques des composites dépendent de facteurs multiples, et les pièces fabriquées présentent des avantages significatifs, bien que leur résistance aux impacts soit limitée en raison de leur forte anisotropie. En résumé, les matériaux composites sont innovants, répondant à divers besoins, mais une compréhension approfondie est nécessaire pour une utilisation optimale.

CHAPITRE III :

***ANALYSE DES POUTRES EN
BETON ARME RENFORCEES PAR
DES PLAQUES***

III.1) Introduction :

On utilise la méthode de collage des plaques afin d'accroître la résistance et la rigidité ou de réparer les structures en béton armé déjà en place. Plusieurs recherches ont été réalisées afin de prédire les contraintes d'interface.

Au fil des dernières décennies, de nombreuses solutions approximatives ont été mises au point afin de mesurer les contraintes d'interface dans les poutres avec plaque collée en acier ou en PRF.

III.2) Méthode théorique :

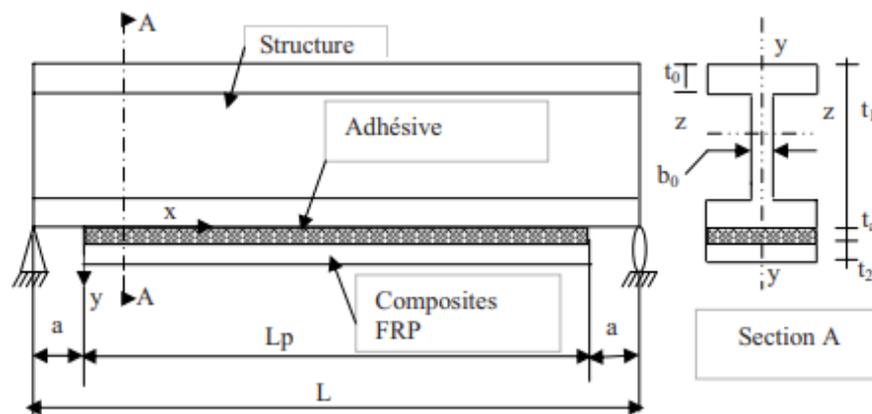


Figure III.1: Poutre renforcées par collage d'une plaque.

Comme c'est montré dans la figure III.1, il s'agit d'une poutre en béton armé (Adhérent 1) renforcée par une plaque en acier ou en PRF (adhérent 2) et collée par une couche adhésive.

Cette poutre renforcée est simplement appuyée et soumise à une charge uniformément répartie.

La géométrie et les sections transversales sont illustrées à la figure III.1.

On considère hypothèses suivantes :

- ❖ Tous les matériaux (la poutre en béton, la plaque en acier et la couche adhésive ont un comportement linéaires élastiques.
- ❖ Les contraintes de cisaillement et les contraintes normales dans la couche adhésive sont constantes sur toute son épaisseur.
- ❖ La courbure de la poutre et de la plaque sont identiques.

Les déformations de l'adhérent 1 et 2 sont dues aux moments de flexion, aux forces axiales et aux forces de cisaillement.

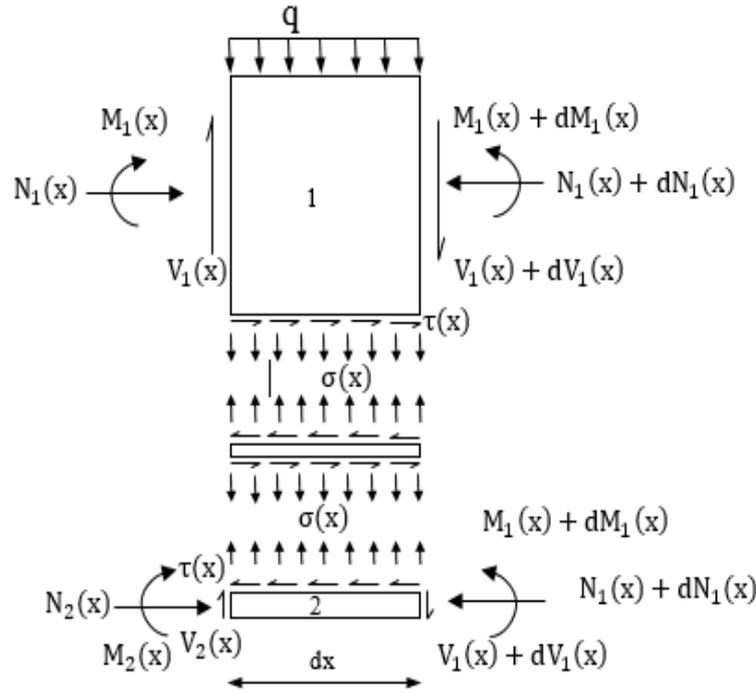


Figure III.2: Segment différentiel de la poutre renforcées.

La figure III.2 représente un segment différentiel d'une poutre renforcée par une plaque.

$\tau(x)$ et $\sigma(x)$ sont respectivement les contraintes d'interface de cisaillement et les contraintes d'interface normales avec convention de signe positif pour le moment de flexion, la force de cisaillement, la force axiale et la charge appliquée.

La dérivation de la nouvelle solution ci-dessous est décrite en termes d'adhérents 1 et 2 ; adhérent 1 étant la poutre et adhérent 2 étant la plaque collée.

III.3) Contraintes d'interface de cisaillement :

La contrainte de cisaillement γ dans la couche adhésive peut être écrite comme suit :

$$\gamma = \frac{du(x,y)}{dy} + \frac{dv(x,y)}{dx} \quad (\text{III.1})$$

$u(x,y)$ et $v(x,y)$ sont respectivement les déplacements horizontal et vertical de la couche adhésive.

$\tau(x)$ est donné comme suit :

$$\tau(x) = G_a \left(\frac{du(x,y)}{dy} + \frac{dv(x,y)}{dx} \right) \quad (\text{III.2})$$

Où G_a est le module de cisaillement de la couche adhésive.

En dérivant l'expression (III.2) par rapport à x , on obtient :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = G_a \left(\frac{d^2u(x,y)}{dy} + \frac{d^2v(x,y)}{dx} \right) \quad (III.3)$$

La courbure est fonction du moment appliqué $M_T(x)$:

$$\frac{d^2v(x)}{dx^2} = -\frac{1}{(EI)_t} M_T(x) \quad (III.4)$$

$(EI)_t$ est la rigidité de flexion totale de la section du composite. $u(x,y)$ doit varier linéairement sur l'épaisseur de l'adhésive t_a , puis :

$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{t_a} (u_2(x) - u_1(x)) \quad (III.5)$$

Et

$$\frac{d^2u(x,y)}{dx dy} = \frac{1}{t_a} \left(\frac{du_2(x)}{dx} - \frac{du_1(x)}{dx} \right) \quad (III.6)$$

Où $u_1(x)$ et $u_2(x)$ sont les déplacements longitudinaux à la base de l'adhérent 1 et au sommet de l'adhérent 2, respectivement. L'équation (III.3) peut donc être réécrite comme suit :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = G_a \left(\frac{du_2(x)}{dx} - \frac{du_1(x)}{dx} - \frac{t_a}{(EI)_t} M_T(x) \right) \quad (III.7)$$

Le troisième terme entre parenthèses dans l'équation (III.7) peut être ignoré [SMI,2001] dans la dérivation suivante. Les déformations à la base de l'adhérent 1 et au sommet de l'adhérent 2 sont indiquées comme suit :

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) - \frac{1}{E_1 A_1} N_1(x) \quad (III.8)$$

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = -\frac{y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{1}{E_2 A_2} N_2(x) \quad (III.9)$$

y_1 est la hauteur entre le bas de la poutre et son centre de gravité et y_2 est la hauteur entre le sommet de la plaque et son centre de gravité.

L'équilibre horizontal donne :

$$\frac{dN_1(x)}{dx} = \frac{dN_2(x)}{dx} = b_2 \tau(x) \quad (III.10)$$

b_2 représente la largeur de la plaque.

Où :

$$N_1(x) = N_2(x) = N(x) = b_2 \int_0^x \tau(x) dx \quad (\text{III.11})$$

Les moments dans les deux adhérents peuvent être reportés comme suit :

$$M_1(x) = RM_2(x) \quad (\text{III.12})$$

Avec

$$R = \frac{E_1 I_1}{E_2 I_2} \quad (\text{III.13})$$

L'équilibre des moments du segment différentiel de la poutre renforcée de la figure III.2 donne :

$$M_T(x) = M_1(x) + M_2(x) + N(x)(y_1 + y_2 + t_a) \quad (\text{III.14})$$

Le moment de flexion dans chaque adhérent est fonction du moment total appliqué et de la contrainte d'interface de cisaillement :

$$M_1(x) = \frac{R}{R+1} [M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx] \quad (\text{III.15})$$

$$M_2(x) = \frac{1}{R+1} [M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx] \quad (\text{III.16})$$

La première dérivée du moment de flexion dans chaque adhérent donne :

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = V_1(x) = \frac{R}{R+1} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (\text{III.17})$$

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = V_2(x) = \frac{1}{R+1} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (\text{III.18})$$

En substituant les équations (III.8) et (III.9) dans l'équation (III.7) et en différenciant l'équation résultante, on obtient :

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} = \frac{G_a}{t_a} \left(-\frac{y_2}{E_2 I_2} \frac{dM_2(x)}{dx} + \frac{1}{E_2 I_2} \frac{dN_2(x)}{dx} + \frac{y_1}{E_1 I_1} \frac{dM_1(x)}{dx} + \frac{1}{E_1 A_1} \frac{dN_1(x)}{dx} \right) \quad (\text{III.19})$$

Substituant les forces de cisaillement (Equations (III.17) et (III.18)) et les forces axiales (Equation (III.11)) sollicitant les deux adhérents dans l'équation (III.19) donne l'équation différentielle définissant la contrainte d'interface de cisaillement :

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} - \frac{G_a b_2}{t_a} \left(\frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right) \tau(x) = -\frac{G_a}{t_a} \left(\frac{y_1 + y_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) V_T(x) \quad (\text{III.20})$$

Pour simplifier et pour un tel chargement, $d^2 V_T(x)/dx^2 = 0$, la solution générale de l'équation (III.20) est donnée par :

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sin h(\lambda x) + m_1 V_T(x) \quad (III.21)$$

Où

$$\lambda^2 = \frac{G_a b_2}{t_a} \left(\frac{(y_1+y_2)(y_1+y_2+t_a)}{E_1 I_1 + E_2 I_2} + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right) \quad (III.22)$$

Et

$$m_1 = \frac{G_a}{t_a \lambda^2} \left(\frac{y_1+y_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (III.23)$$

III.4) Contraintes d'interface normales :

La contrainte normale dans la couche adhésive, $\sigma(x)$ est donnée par l'expression suivante :

$$\sigma(x) = \frac{E_a}{t_a} [v_2(x) - v_1(x)] \quad (III.24)$$

Où $v_1(x)$ et $v_2(x)$ sont les déplacements verticaux des adhérents 1 et 2, respectivement.

En dérivant l'équation (III.24) deux fois on obtient :

$$\frac{d^2 \sigma(x)}{dx^2} = K_n \left[\frac{d^2 v_1(x)}{dx^2} - \frac{d^2 v_2(x)}{dx^2} \right] \quad (III.25)$$

Considérant les relations moment-courbure pour les poutres renforcées et le renforcement externe, respectivement :

$$\frac{d^2 v_1(x)}{dx^2} = -\frac{M_1(x)}{E_1 I_1} \quad \text{et} \quad \frac{d^2 v_2(x)}{dx^2} = -\frac{M_2(x)}{E_2 I_2} \quad (III.26)$$

L'équilibre entre les adhérents 1 et 2 conduits aux relations suivantes :

Adhérent 1 :

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = V_1(x) - b_2 y_1 \tau(x) \quad \text{et} \quad \frac{dV_1(x)}{dx} = -b_2 \sigma(x) - q \quad (III.27)$$

Adhérent 2 :

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = V_2(x) - b_2 y_2 \tau(x) \quad \text{et} \quad \frac{dV_2(x)}{dx} = -b_2 \sigma(x) \quad (III.28)$$

Sur la base des équations d'équilibre ci-dessus, les équations différentielles déterminantes de la flexion des adhérents 1 et 2, exprimées en termes de contraintes d'interface de cisaillement et de contraintes d'interface normales, sont données comme suit :

Adhérent 1 :

$$\frac{d^4 v_1(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_1 I_1} b_2 \sigma(x) + \frac{y_1}{E_1 I_1} b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_1 I_1} \quad (\text{III.29})$$

Adhérent 2 :

$$\frac{d^4 v_2(x)}{dx^4} = -\frac{1}{E_2 I_2} b_2 \sigma(x) + \frac{y_2}{E_2 I_2} b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (\text{III.30})$$

La substitution des équations (III.29) et (III.30) dans la quatrième dérivée de la contrainte d'interface normale pouvant être obtenue à partir de l'équation (III.24) donne l'équation différentielle exprimant la contrainte d'interface normale ci-dessous :

$$\frac{d^4 \sigma(x)}{dx^4} + \frac{E_a b_2}{t_a} \left(\frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right) \sigma(x) + \frac{E_a b_2}{t_a} \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q E_a}{t_a E_1 I_1} = 0 \quad (\text{III.31})$$

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

$$\sigma(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] + e^{-\beta x} [C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{III.32})$$

Pour des grandes valeurs de x , on suppose que la contrainte normale est proche de zéro et que $C_3 = C_4 = 0$ et donc la solution générale s'exprime comme suit :

$$\sigma(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{III.33})$$

Où

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_a b_2}{4 t_a} \left(\frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right)} \quad (\text{III.34})$$

Et

$$n_1 = \frac{y_1 E_2 I_2 - y_2 E_1 I_1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \quad (\text{III.35})$$

$$n_2 = \frac{E_2 I_2}{b_2 (E_1 I_1 + E_2 I_2)} \quad (\text{III.36})$$

D'après Smith et al (2001), les constantes C_1 et C_2 dans l'équation (III.33) sont déterminés en utilisant les conditions aux limites appropriées et de ce fait :

$$C_1 = \frac{E_a}{2\beta^3 t_a} \frac{1}{E_1 I_1} [V_T(0) + \beta M_T(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left(\frac{d^4 \tau(x)}{dx^4} \Big|_{x=0} + \beta \frac{d^3 \tau(x)}{dx^3} \Big|_{x=0} \right) \quad (\text{III.37})$$

$$C_2 = \frac{E_a}{2\beta^2 t_a} \frac{1}{E_1 I_1} M_T(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(x)}{dx^3} \Big|_{x=0} \quad (\text{III.38})$$

Où

$$n_3 = \frac{E_a b_2}{t_a} \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \right) \quad (\text{III.39})$$

III.5) Analyse des contraintes pour une charge uniformément répartie :

La solution générale pour la contrainte d'interface de cisaillement pour une poutre simplement appuyée et soumise à une charge uniformément répartie (Figure 30) est donnée ci-dessous :

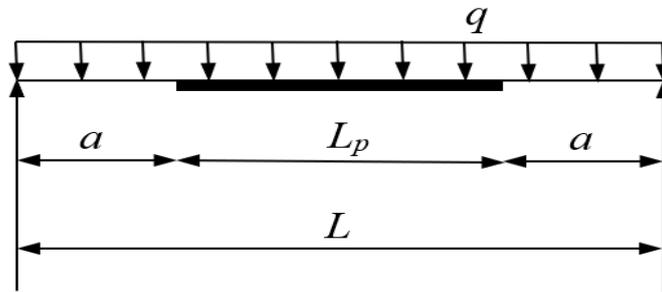


Figure III.3: Poutre simplement appuyée soumise à une charge uniformément répartie.

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 q \left(\frac{L}{2} - a - x \right) \quad (\text{III.40})$$

Les constantes d'intégration seront déterminées en appliquant des conditions aux limites appropriées.

À $x = 0$, le moment à la fin de la plaque $M_2(0) = N_1(0) = N_2(0) = 0$ et par conséquent :

$$M_1(0) = M_T(0) = \frac{q a}{2} (L - a) \quad (\text{III.41})$$

La substitution des équations (III.8) et (III.9) dans l'équation (III.7) tout en ignorant le troisième terme et en appliquant la condition limite ci-dessus donne :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} \Big|_{x=0} = -m_2 M_T(0) \quad (\text{III.42})$$

Où :

$$m_2 = \frac{G_a y_1}{t_a E_1 I_1} \quad (\text{III.43})$$

En substituant l'équation (III.21) dans l'équation (III.42), les constantes B_1 et B_2 peuvent être déterminés comme suit :

$$B_2 = -\frac{m_2 q a}{2\lambda} (L - a) + \frac{m_1}{\lambda} q = -B_1 \quad (\text{III.44})$$

En substituant les expressions de B_1 et B_2 dans l'équation (III.40), la solution générale pour la contrainte d'interface de cisaillement pour ce cas de charge peut être réécrite comme suit :

$$\tau(x) = \left[\frac{m_2 a}{2} (L - a) - m_1 \right] \frac{q e^{-\lambda x}}{\lambda} + m_1 q \left(\frac{L}{2} - a - x \right) \quad 0 \leq x \leq L_p \quad (\text{III.45})$$

$$\sigma(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 \frac{P}{L} \quad (\text{III.46})$$

III.6) La flexion des poutres renforcées par des plaques en FRP :

$$\frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} = -\frac{1}{E_1 I_1} M_T(x) \quad (\text{III.47})$$

$w_1(x)$ est la déformation verticale de la poutre renforcée.

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

$$M_1(x) = \frac{E_1 I_1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \cdot M_T(x) \quad (\text{III.48})$$

Substitution de l'équation ci-dessus dans l'équation (III.47) donne :

$$\frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} = -\frac{1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \cdot M_T(x) \quad (\text{III.49})$$

En intégrant l'équation différentielle de second ordre (III.49) par rapport à x dans la zone renforcée de la poutre, on obtient l'expression de l'équation différentielle du premier ordre de la déformation verticale avec une constante notée $D3$.

$$\frac{dw_1(x)}{dx} = \int_0^x \left[-\frac{1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \cdot M_T(x) dx \right] + D3 \quad (\text{III.50})$$

L'équation de la déformation verticale dans la zone renforcée de la poutre est obtenue en intégrant l'équation différentielle (III.50).

$$w_1(x) = \int_0^x \left[\int_0^x \left[-\frac{1}{E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2} \cdot M_T(x) dx \right] + D3 \right] dx + D4 \quad (\text{III.51})$$

Où D4 est la constante d'intégration.

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

$$\frac{d^2 w_0(x)}{dx^2} = \frac{-M_T(x)}{E_1 \cdot I_1} \quad (\text{III.52})$$

$w_0(x)$ est la déformation verticale de la zone non renforcée de la poutre

En intégrant deux fois l'équation (III.52), on obtient l'expression suivante :

$$\frac{dw_0(x)}{dx} = \int_0^x \frac{-M_T(x)}{E_1 \cdot I_1} + D1 \quad (\text{III.53})$$

$$w_0(x) = \int_0^x \left[\int_0^x \frac{-M_T(x)}{E_1 \cdot I_1} + D1 \right] dx + D2 \quad (\text{III.54})$$

Où D1 et D2 sont les constantes d'intégration de cette équation.

L'expression de la déformation verticale de la poutre renforcée est définie comme suit :

$$w(x) = w_0(x) + w_1 \quad (\text{III.55})$$

Les constantes d'intégration D1, D2, D3 et D4 sont déterminées en vérifiant les conditions aux limites appropriées.

Ces conditions sont exprimées par les expressions suivantes :

$$w_0(x = -a) = 0, w_0(x = 0) = w_1(x = 0), \frac{dw_0}{dx}(x = 0) = \frac{dw_1}{dx}(x = 0)$$

$$\text{Et } \frac{dw_1}{dx} \left(x = \frac{lp}{2} \right) = 0 \quad (\text{III.56})$$

III.7) Effet thermique sur le renforcement :

Tenant compte de l'effet thermique sur le renforcement de la poutre en béton armé, les équations des déformations (III.57) et (III.58) à la base de l'adhérent 1 et au sommet de l'adhérent 2 seront données par les équations suivantes :

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) - \frac{1}{E_1 A_1} N_1(x) + \alpha_1 \Delta T \quad (\text{III.57})$$

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = -\frac{y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{1}{E_2 A_2} N_2(x) + \alpha_2 \Delta T \quad (\text{III.58})$$

Avec : α_1 et α_2 sont des coefficients d'expansion thermique de la poutre et le renfort respectivement

ΔT est la variation de la température

Les constantes B_1 et B_2 peuvent être déterminés comme suit :

$$B_2 = -\frac{m_2 q a}{2\lambda} (L - a) + \frac{m_1}{\lambda} q + \frac{G_a}{t_a \lambda} (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T = -B_1 \quad (\text{III.59})$$

En substituant les expressions de B_1 et B_2 dans l'équation (III.40), la solution générale pour la contrainte d'interface de cisaillement avec effet thermique peut être réécrite comme suit :

$$\tau(x) = \left[\frac{m_2 a}{2} (L - a) - m_1 - \frac{G_a}{q t_a} (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T \right] \frac{q e^{-\lambda x}}{\lambda} + m_1 q \left(\frac{L}{2} - a - x \right) \quad 0 \leq x \leq L_p \quad (\text{III.60})$$

CHAPITRE IV :
RESULTATS ET ANALYSE

IV.1) Résultats et Analyse :

On considère une poutre en béton armé de section en I, renforcée à l'aide d'un composite en PRF (CFRP). Cette poutre est de longueur de 3m, chargée par une charge uniformément répartie de 50 KN/ml et la distance entre le support et le bord de la plaque est de 30 cm.

Le tableau IV.1 résume les propriétés géométriques et mécaniques des matériaux utilisés.

Tableau IV.1 : Caractéristiques géométriques et mécaniques des matériaux de la poutre renforcées

Composants	Largeur b_I (mm)	Hauteur h_I (mm)	Module de Young E (MPa)	Coefficient de Poisson ν
Poutre en béton armé BA	$b_1 = 200$	300	$E_1 = 30000$	-
Couche adhésive	$b_a = 300$	2	$E_a = 2000$	$\nu_a = 0.35$
Plaque CFRP (Renfort)	$b_2 = 200$	2	$E_2 = 100000$	-

IV.2) Effet de l'épaisseur de la plaque :

Les figures IV.1 et IV.2 illustrent de manière significative l'impact de l'épaisseur de la plaque sur la génération des contraintes d'interface, pour différentes valeurs de l'épaisseur de la plaque examinées dans cette étude paramétrique ($h_2 = 2$ mm, $h_2 = 4$ mm et $h_2 = 8$ mm).

On observe que, dans notre cas, les contraintes d'interface normales et de cisaillement sont considérablement influencées par l'épaisseur de la plaque. En effet, ces contraintes augmentent avec l'accroissement de l'épaisseur du renfort, soulignant ainsi l'importance de minimiser ladite épaisseur.

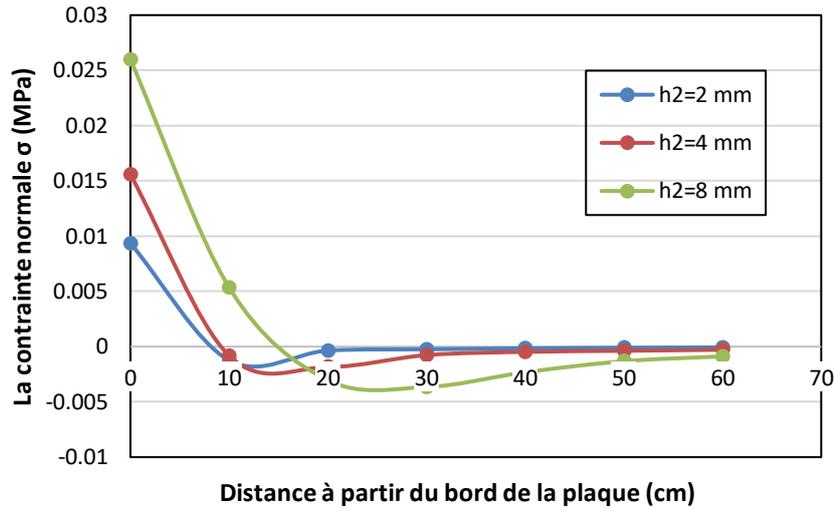


Figure IV.1: Effet de l'épaisseur de la plaque sur la contrainte normale

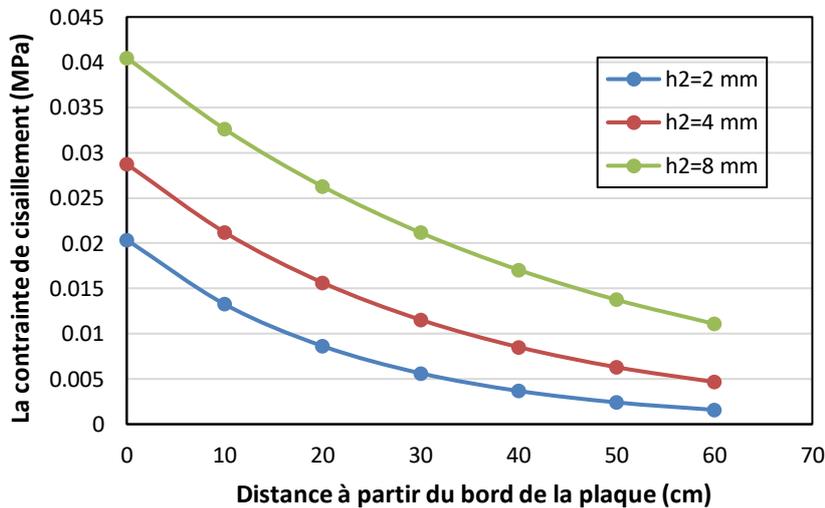


Figure IV.2: Effet de l'épaisseur de la plaque sur la contrainte de cisaillement

IV.3) Effet de l'épaisseur de l'adhésive :

Les figures IV.3 et IV.4 présentent l'impact de l'épaisseur de la couche adhésive sur les contraintes d'interfaces normales et de cisaillement pour une poutre en béton armé renforcée par une plaque en CFRP. Plusieurs valeurs d'épaisseur de la couche adhésive ont été examinées ($t_a = 2$ mm, $t_a = 4$ mm et $t_a = 8$ mm) pour analyser cet effet.

Il est observé que l'épaisseur de la couche adhésive a un effet significatif sur les contraintes de cisaillement et les contraintes normales. En augmentant l'épaisseur de la couche adhésive, ces dernières diminuent surtout au niveau des extrémités de la plaque.

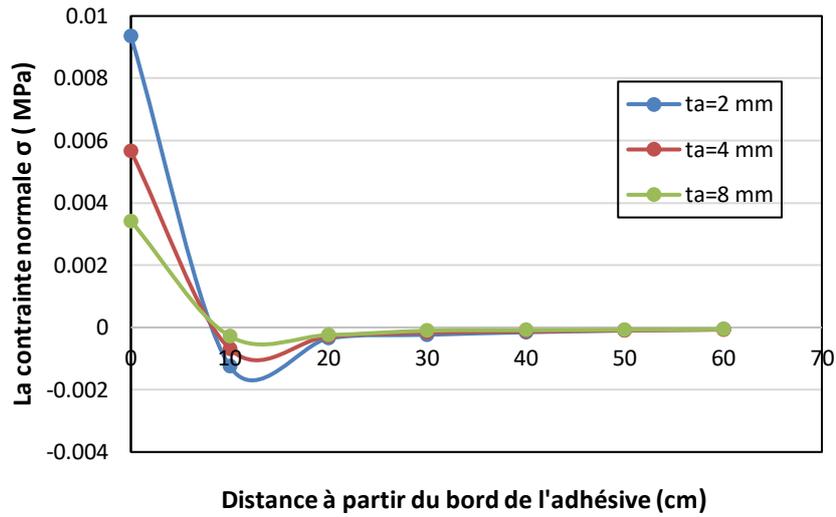


Figure IV.3: Effet de l'épaisseur de l'adhésive sur la contrainte normale

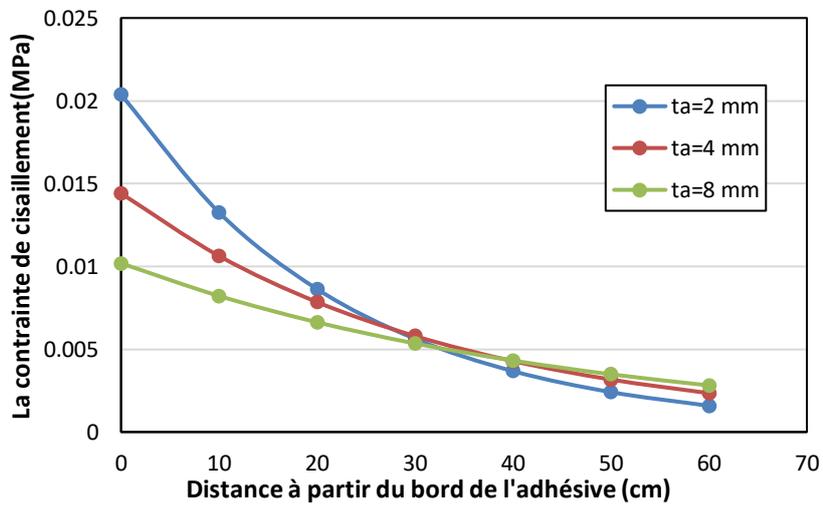


Figure IV.4: Effet de l'épaisseur de l'adhésive sur la contrainte de cisaillement

IV.4) Effet thermique :

Les figures IV.5 et IV.6 illustrent les contraintes d'interface de cisaillement ainsi que les contraintes d'interface normales pour différentes variations de température (0, 20°C, 40°C et 100°C). Il est évident que l'effet thermique exerce une influence significative sur ces contraintes d'interface. Ces graphiques mettent en évidence une augmentation des contraintes normales et de cisaillement à mesure que les variations de température augmentent. En outre, il est observé que les contraintes maximales se situent au bord de la plaque et diminuent progressivement en s'éloignant de celui-ci.

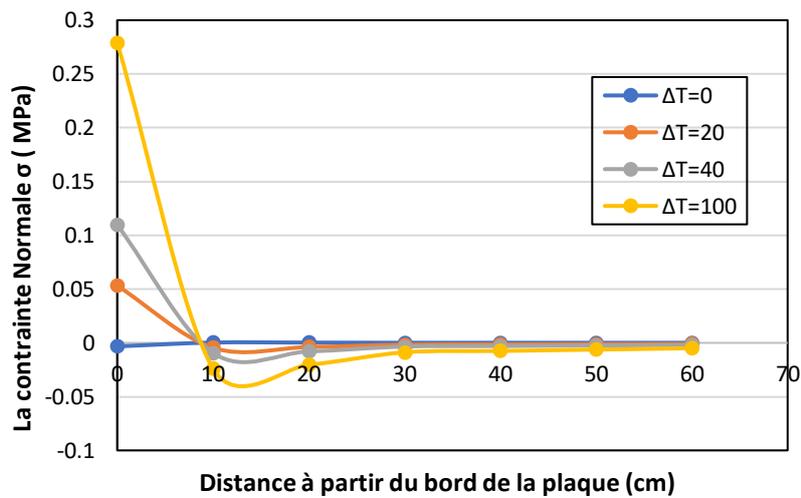


Figure IV.5: Effet thermique sur la contrainte normale pour une poutre en BA renforcée

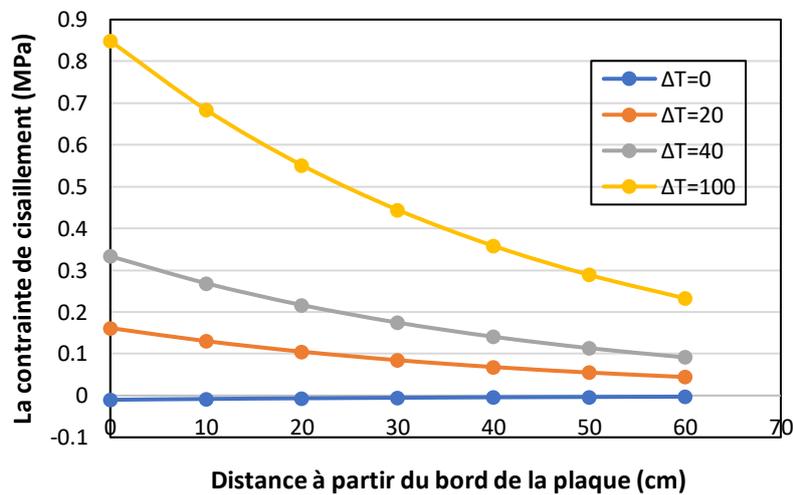


Figure IV.6: Effet thermique sur la contrainte de cisaillement pour une poutre en BA renforcée

IV.5) Conclusion :

Dans cette section, nous avons présenté une analyse paramétrique pour déterminer les contraintes d'interface dans une poutre en béton armé renforcée par des matériaux composites, en tenant compte des variations thermiques. Nos résultats paramétriques révèlent que les contraintes d'interface normales et de cisaillement sont maximales aux extrémités du stratifié, et qu'elles augmentent significativement avec l'inclusion des effets thermiques.

De plus, nous observons une augmentation des contraintes d'interface avec l'épaisseur de la plaque. Ainsi, il est toujours préconisé d'opter pour des épaisseurs réduites, notamment dans le cas des PRF. Par ailleurs, l'augmentation de l'épaisseur de la couche adhésive entraîne une réduction notable des contraintes d'interface, surtout au niveau des extrémités de la plaque.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La conclusion de cette étude paramétrique sur les contraintes d'interface dans une poutre en béton armé renforcée par des plaques composites, prenant en considération les variations thermiques, révèle plusieurs points saillants.

Dans un premier temps, il est évident que les contraintes d'interface normales et de cisaillement atteignent leur maximum aux extrémités de la plaque de renfort. Ces contraintes connaissent une augmentation significative avec l'introduction des effets thermiques, soulignant ainsi la nécessité d'inclure ces variations de température lors de la conception et de l'analyse de telles structures.

Par ailleurs, l'analyse démontre que l'épaisseur de la plaque composite exerce un impact considérable sur les contraintes d'interface. De manière générale, il est recommandé de privilégier des épaisseurs réduites, particulièrement dans le cas des plaques composites, afin de minimiser ces contraintes.

Quant à l'épaisseur de la couche adhésive, une augmentation de celle-ci conduit à une réduction notable des contraintes d'interface, notamment au niveau des extrémités de la plaque. Cela souligne l'importance de sélectionner avec discernement l'épaisseur de la couche adhésive pour assurer une distribution optimale des contraintes.

En somme, cette analyse paramétrique fournit des données précieuses pour la conception et l'optimisation des poutres renforcées par des plaques composites dans des conditions d'utilisation réelles, en tenant compte à la fois des aspects mécaniques et thermiques. Elle met en exergue l'importance de prendre en considération divers paramètres pour garantir la sécurité et la durabilité des structures renforcées.

En conclusion, les matériaux composites occupent une place cruciale dans le domaine de la construction, offrant divers avantages significatifs. Leur résistance et leur durabilité accrues permettent la construction de structures plus solides et pérennes. Leur légèreté contribue à réduire la masse des structures et à améliorer l'efficacité des matériaux. Leur résistance à la corrosion et aux éléments environnementaux en fait des choix adaptés pour les environnements difficiles et les structures maritimes. Leur flexibilité de conception favorise la réalisation de structures architecturales innovantes et esthétiquement attrayantes.

Enfin, leur durabilité et leur potentiel de recyclage contribuent à réduire l'impact potentiel de recyclage contribuent à réduire l'impact environnemental et à promouvoir le développement durable dans le secteur de la construction.

Ainsi, l'utilisation de matériaux composites s'avère essentielle pour améliorer l'efficacité de la construction, réduire les coûts et élargir les possibilités de conception, en faisant partie intégrante du développement de l'industrie de la construction et de l'amélioration de la qualité des structures.

ANNEXE

restart;

```
[> #####Programme de calcul les Contraintes de cisaillement
    et les contraintes Normales#####
[> ####Les Données:
```

$$L := 3000 : a := 300 : b1 := 200 : h1 := 300 : b2 := 200 : h2 := 2 : E1 := 30000 : A1 := 360000 : E2 := 100000 : Ea := 2000 : \nu a := 0.35 : A2 := b2 \cdot h2 : y1 := \frac{h1}{2} : y2 := \frac{h2}{2} : I1 := 4.28 \cdot 10^{10} : I2 := \frac{b2 \cdot h2^3}{12} : ta := 8 : q := 50 : \alpha_1 := 11 \cdot 10^{-6} : \alpha_2 := 9 \cdot 10^{-6} : \Delta T := 100 :$$

$$G_a := \frac{Ea}{2 \cdot (1 + \nu a)} :$$

$$\lambda := \sqrt{\left(\left(\frac{G_a \cdot b2}{ta} \right) \cdot \left(\frac{(y1 + y2) \cdot (y1 + y2 + ta)}{(E1 \cdot I1 + E2 \cdot I2)} + \frac{1}{E1 \cdot A1} + \frac{1}{E2 \cdot A2} \right) \right)} :$$

$$m_1 := \frac{G_a}{ta \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{y1 + y2}{E1 \cdot I1 + E2 \cdot I2} \right) :$$

$$m_2 := \frac{G_a \cdot y1}{ta \cdot E1 \cdot I1} :$$

$$B_2 := - \left(- \frac{m_2 \cdot q \cdot a}{2 \cdot \lambda} \cdot (L - a) - \frac{m_1}{\lambda} \cdot q + \frac{G_a}{ta \cdot \lambda} \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T \right) :$$

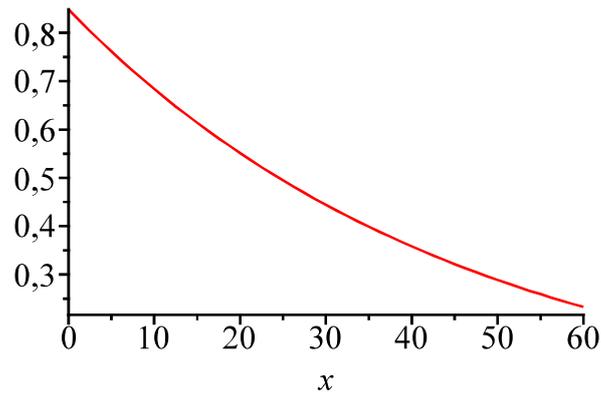
$$B_1 := -B_2 :$$

```
[> #####La contrainte de cisaillement:
```

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

```
[> #####Les Figures:
```

$$\text{plot}(\tau(x), x = 0 .. 60)$$



$$\beta_0 := \sqrt[4]{\frac{Ea \cdot b2}{4 \cdot ta} \cdot \left(\frac{1}{E1 \cdot I1} + \frac{1}{E2 \cdot I2} \right)} :$$

$$\beta := \text{evalf}(\beta_0) :$$

$$n_1 := \frac{y1 \cdot E2 \cdot I2 - y2 \cdot E1 \cdot I1}{E1 \cdot I1 + E2 \cdot I2} :$$

$$n_2 := \frac{E2 \cdot I2}{b2 \cdot (E1 \cdot I1 + E2 \cdot I2)} :$$

$$n_3 := \frac{Ea \cdot b2}{ta} \cdot \left(\frac{y1}{E1 \cdot I1} - \frac{y2}{E2 \cdot I2} \right) :$$

$$M_T(0) := \left(\left(\frac{q \cdot a}{2} \right) \cdot (L - a) \right) :$$

$$V_T(0) := q \cdot \left(\left(\frac{L}{2} \right) - 0 - a \right) :$$

$$\tau_4 := \frac{d^4}{dx^4} \tau(x) :$$

$$\tau_{40} := \text{eval}(\tau_4, x=0) :$$

$$\tau_3 := \frac{d^3}{dx^3} \tau(x) :$$

$$\tau_{30} := \text{eval}(\tau_3, x=0) :$$

$$C_1 := \frac{Ea}{2 \cdot \beta^3 \cdot ta} \cdot \frac{1}{E1 \cdot I1} \cdot (V_T(0) + \beta \cdot M_T(0)) - \frac{n_3}{2 \cdot \beta^3} \cdot \tau(0) + \frac{n_1}{2 \cdot \beta^3} \cdot (\tau_{40} + \beta \cdot \tau_{30}) :$$

$$C_2 := \frac{Ea}{2 \cdot \beta^2 \cdot ta} \cdot \frac{1}{EI \cdot II} \cdot M_T(0) - \left(\frac{n_1}{2 \cdot \beta^2} \cdot \tau_{30} \right) :$$

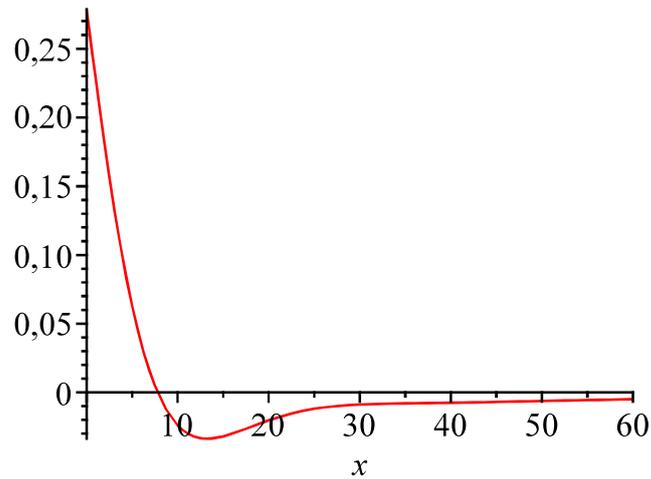
$$\tau l := \frac{d}{dx} \tau(x) :$$

[> #####La contrainte Normale:

$$\sigma(x) := e^{-\beta \cdot x} \cdot (C_1 \cdot \cos(\beta \cdot x) + C_2 \cdot \sin(\beta \cdot x)) - n_1 \cdot \tau l - n_2 \cdot q :$$

[> #####Les Figures:

plot($\sigma(x)$, x = 0..60)



REFERANCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Khobizi Sena, « Réhabilitation des structures en béton armé » 2017.
- [2] Ammer Boudjelel Mehdi Et Al, « Etude du comportement mécanique des poutres en béton à haute performance, renforcées des fibres de verre et de végétale » 2021/2022.
- [3] Bensalem Sara, « Chapitre 2 : Principales pathologies des constructions » 2018.
- [4] Gadri Karima, « Contribution à l'étude d'un béton de sable avec fibres et résine destine pour la réparation mince des structures » 2007.
- [5] Lakhal Ridha, « Chapitre II : Les causes de dégradation des bétons » .
- [6] D. G. Layachi, « Pathologies des constructions », 2019.
- [7] Ouiza Kaci, « Outil d'aide à la décision applique aux ouvrages d'art » 2016-2017.
- [8] Anouar ghodbane et al, « Effet de la détérioration des éléments en béton arme sur le comportement sismique des structures par analyse dynamique non-linéaire,» 2019.
- [9] Farid abou chakra, « Renforcement des poteaux en béton armé au moyen de polymère renforcé par fibre de carbone - comparaison des codes,» 09 mars 2016.
- [10] Bouferma meriem et al, « Renforcement des structures par des matériaux composites»,2020.
- [11] T Igueni, L Benamara, « Elaboration et caractérisation d ' un matériau composite chargé en poudre d ' élastomère », 2018.
- [12] M. Mohamed, Analyse mécanique des structures composites : Etude comparative entre les différentes théories des plaques , 2015.
- [13] M. Anouar, « Effet des traitements chimiques sur les propriétés mécaniques des composites polychlorures de vinyle/fibre de palmier », p. 2019-2020, 2020.
- [14] Y Ghizlane, CJ Zineb, « Rapport à propos les composites et nanocomposites », Mémoire magister. Univ. Hassan II, 2019.
- [15] L. Gornet, « Généralités sur les Matériaux Composites », 2011.
- [16] B. Salima. Maroua. Loubna, « Contribution à l'étude du comportement des poutres métalliques des ouvrages d'art renforcées par différents types de composite », 2018.