



**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 :

MEBAREK Romaissa

MENACER Torkia

*Sujet du mémoire*

***Contribution à l'étude de l'efficacité d'une poutre console en  
FGM renforcée par différent types de composites***

*Soutenu publiquement le .../06/2022 devant le jury composé de :*

Mr, KERROUM Nadir

Président

Mr, RABAHI Abderezak

Rapporteur

Mr, KRIM Abdellah

Examineur

Mr, DJEBLI Benyagoub

Examineur

2021/2022

## ***Remerciement***

*Je remercie dieu tout puissant de m'avoir donné la force  
d'atteindre mon but et accomplir avec succès mon humble travail*

*Nous tenons également exprimer nos vifs remerciements à  
notre encadreur Dr RABAHI Abderezak qui nous a apporté une  
aide précieuse. Nous lui exprimons notre gratitude pour sa grande  
disponibilité ainsi que pour sa compréhension et encouragements  
qu'il nous a apportés ...*

*Nos remerciements vont aussi aux membres du jury qui ont  
accepté d'examiner notre travail.*

*Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous  
nos amies et collègues  
pour leur soutien.*

# *Dédicace*

*Je dédie Ce modeste travail :*

*A ma mère FATIMA source de respect, en témoignage de ma profonde  
reconnaissance*

*Pour tout l'effort et le soutien incessant qui m'a toujours apporté.*

*A mon très cher papa SAAD ma source d'affectation de courage et  
conseillé*

*pendant mes plus pénibles moments et qui m'a guidé vers le chemin droit.*

*A toute la famille « Mebarek / DJellali / Segheir »*

*A mon frère (Bahaa Eddine Iyad) / ma sœur (Tassnime Bothaina)*

*A Ma consœur et binôme Menacer Torkia et sa famille pour laquelle je  
souhaite*

*une vie pleine de joie et de réussite.*

*A toute la promotion sortante (2021/2022)*

*Pour ceux qui je n'ai pas cité bien sûr ne croyait pas que je vous ai oublié, je  
vous porte toujours dans mon cœur*

*Mebarek R*

# *Dédicace*

*Je dédie Ce modeste travail :*

*A ma chère mère source de respect, en témoignage de ma profonde  
reconnaissance*

*Pour tout l'effort et le soutien incessant qui m'a toujours apporté.*

*A mon très cher père ma source d'affectation de courage et conseillé  
pendant mes plus pénibles moments et qui m'a guidé vers le chemin droit.*

*A toute la famille « Menacer »*

*A mes frère (Kadi / Sadek /Sidahmed) / mes sœur (Hanane/Noria/Hayat  
et son fils Youcef)*

*A Ma consœur et binôme Mebarek Romaissa et sa famille pour laquelle je  
souhaite*

*une vie pleine de joie et de réussite.*

*A toute la promotion sortante (2021/2022)*

*Pour ceux qui je n'ai pas cité bien sûr ne croyait pas que je vous ai oublié, je  
vous porte toujours dans mon cœur*

**Menacer T**

## Sommaire

<i>Liste des tableaux</i> .....	IV
<i>Liste des figures</i> .....	V
<i>Liste des notations</i> .....	IX
<i>Résumé</i> .....	XI
<i>Abstract</i> .....	XII
<i>ملخص</i> .....	XIII
<i>Introduction générale</i> .....	XIV

***Chapitre I : Pathologies et techniques de réhabilitations des structures en génie civil***

<i>I.1 Introduction</i> .....	1
I.2.1. Causes chimiques de dégradation.....	2
I.2.2. Causes physiques de dégradation.....	7
I.2.3. Causes mécaniques de dégradation.....	7
I.3. Différentes technique réhabilitations des structures en génie civil.....	9
I.3.1 Définition de renforcement.....	9
I.3.2 Définition de Réparation.....	10
I.3.3. Réhabilitation.....	10
I.3.3.1. Techniques de réhabilitation.....	11
<i>I.4 Méthodes de réparation structurales</i> .....	14
I.4.1 Réparation par les plats métalliques.....	14
I.4.2 Réparation par matériaux composites.....	16
<i>I.5. Conclusion</i> .....	18

***Chapitre II: Généralité sur les matériaux avancés***

<i>II.1. Introduction</i> .....	20
<i>II.2. Généralité sur les matériaux composites à base de fibres</i> .....	21
II.2.1. Définition des composites à base de fibres.....	21

II.2.2. Les différents types de composites .....	24
II.2.3. Les matrices .....	27
II.2.3.2. Les matrices thermodurcissables (TD) .....	28
II.2.3.3 Les matrices thermoplastiques (TP) .....	28
<i>II.3. Généralité sur les matériaux à gradient de propriété FGM</i> .....	29
II.3.2. Méthode de fabrication des FGM .....	32
II.3.2.1. Frittage en infiltration .....	32
II.3.2.2. Implantation ionique .....	33
II.3.2.3 Technique de dépôt à la vapeur .....	33
II.3.2.4 Métallurgie des poudres.....	33
II.3.2.5 Méthode centrifuge .....	33
II.3.2.6 Techniques de fabrication par impression 3D .....	34
II.3.3.1 Matériaux à gradient de composition chimique .....	35
II.3.3.2 Matériaux à gradient de porosité .....	36
II.3.3.3 Matériaux à gradient microstructural .....	37
II.3.4. Les différentes lois de mélange .....	38
II.3.4.1 Loi de mélange de composites.....	38
II.3.4.2. Les Lois de mélange des FGM .....	39
II.3.4.2.1. Propriétés matérielles de la plaque P-FGM.....	40
II.3.4.2.2. Propriétés matérielles de la plaque S-FGM.....	41
II.3.4.2.3. Propriétés matérielles de la plaque E-FGM.....	43
<i>II.4. Conclusion</i> .....	44
<b><i>Chapitre III: Mode de rupture des poutres renforcées</i></b>	
<i>III.1. Introduction</i> .....	45
III.2.1. Le cas d'une poutre en béton armé renforcée par matériau composite .....	46
III.2.2. Le cas d'une poutre métallique renforcée par matériau composite .....	47

<i>III.3. Les différents modes de rupture des poutres renforcées par matériaux composites..</i>	48
III.3.1. Rupture due à la flexion.....	49
III.3.2. Rupture due au cisaillement .....	50
III.3.4. Séparation d'enrobage en béton .....	51
III.3.5. Décollement du composite à l'extrémité .....	51
III.3.6. Décollement du composite à mi- portée .....	52
<i>III.4. Conclusion.....</i>	53
<b><i>Chapitre IV: Etude analytique des contraintes d'interface d'une poutre console en FGM renforcée par différents matériaux composites</i></b>	
<i>IV.1. Introduction .....</i>	55
<i>IV.2. Formulation mathématique .....</i>	55
IV.2.1. Contraintes de cisaillement .....	57
IV.2.2. Contraintes normales.....	59
<i>IV.3. Validation du modèle Proposée.....</i>	62
<i>IV.4. Etude paramétrique .....</i>	63
IV.4.1. Effet de la longueur a .....	63
IV.4.2. Effet de l'épaisseur de la colle d'adhésive $t_a$ .....	64
IV.4.3. Effet de l'épaisseur de la plaque $t_2$ .....	65
IV.4.4. Effet de coefficient de poisson de l'adhésive $\nu_a$ .....	66
IV.4.6. Effet de la fraction volumique $V_f$ .....	68
<i>IV.5. Conclusion.....</i>	69
<i>Conclusion générale.....</i>	71
<i>Référence bibliographique</i>	

## Liste des tableaux

<b>Tableau II.1:</b> Propriétés des fibres de Verre .....	25
<b>Tableau II.2:</b> Propriétés des fibres de Kevlar .....	26
<b>Tableau II.3 :</b> Principales différences entre les Matrices TP et TD. ....	28
<b>Tableau II.4 :</b> Comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal. ....	31
<b>Tableau IV.1 :</b> Propriétés géométriques et mécaniques des matériaux. ....	62
<b>Tableau IV.2 :</b> L'influence de la longueur ( $a$ ) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par différents types de composites .....	63
<b>Tableau IV.3 :</b> L'influence de l'épaisseur de la couche d'adhésive $t_a$ sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par différents types de composites ..	64
<b>Tableau IV.4 :</b> L'influence de l'épaisseur de la plaque composite $t_2$ sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par différents types de composites. .	65
<b>Tableau IV .5</b> l'influence effet de coefficient de poisson de l'adhésive $\ll v_a \gg$ sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM endommagée renforcée par différents types de composites. ....	66
<b>Tableau IV.6 :</b> L'influence de la rigidité de la colle d'adhésive $E_a$ sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par différents types de composites. .	67
<b>Tableau IV.7:</b> l'influence effet de la fraction volumique des fibres $V_f$ sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par différents types de composites. .	68

## Liste des figures

<b>Figure I.1 :</b> Organigramme de Principales Pathologie des constructions.....	1
<b>Figure I.2 :</b> Progression de la carbonatation .....	3
<b>Figure I.3 :</b> Fissures causées par la Réaction Alkali-Silice rapporté par Mehta .....	4
<b>Figure I.4 :</b> Exemple de l'attaque par l'acide sulfurique dosé à 5% pour un béton ordinaire durant quatre mois .....	4
<b>Figure.I.5 :</b> (a) Attaque de la surface d'un bassin de station d'épuration, (b) Prisme de Mortier dont la partie de droite a subi l'attaque d'un acide. ....	6
<b>Figure.I.6 :</b> Corrosion avancée des armatures des poutrelles .....	6
<b>Figure.I.7 :</b> Effet du gel-dégel sur le béton : écaillage du béton d'enrobage et corrosion des armatures. ....	7
<b>Figure.I.8 :</b> Fissuration du béton.....	9
<b>Figure I.9 :</b> Renforcement d'une poutre par adjonction d'armatures additionnelles en sa partie inférieure .....	11
<b>Figure I.10 :</b> mise en place des canules d'injections.....	11
<b>Figure I.11 :</b> ouvrage renforcé par béton projeté .....	12
<b>Figure I.12 :</b> Principe de réhabilitation par coque complète et partielle .....	13
<b>Figure I.13 :</b> principe de calage de coques complètes avec étai vertical .....	14
<b>Figure I.14 :</b> renfort par plaque d'acier.....	15
<b>Figure I.15 :</b> Application de plats métalliques selon le procédé L'Hermitte .....	16
<b>Figure I.16 :</b> Tôles collées ; (a) difficulté de manutention ; (b) Renforcement du viaduc de terre noire par tôles collées perforées -Brevet Freyssinet- .....	16
<b>Figure I.17 :</b> Ouvrages en béton armé renforcées par des tissus de par matériaux composites .....	17
<b>Figure I.18 :</b> Voûte renforcée par carbone. ....	17
<b>Figure I.19 :</b> Renforcement de structure en BA par matériau composite.....	17
<b>Figure II.1 :</b> Configurations des composites et des FGM .....	20

<b>Figure II.2:</b> Les différents types de renfort de base. ....	23
<b>Figure II.3 :</b> Différentes formes de renforts continus.....	19
<b>Figure II.4 :</b> Différents types des fibres de carbone .....	24
<b>Figure II.5:</b> Fibre de verre .....	25
<b>Figure II.6:</b> Histogramme des résistances à la rupture en traction des différentes catégories de fibres .....	25
<b>Figure II.7 :</b> différents types des fibres d'aramide.....	26
<b>Figure II.8 :</b> Classification des matrices. ....	27
<b>Figure II.9 :</b> Développement des matériaux depuis l'âge de bronze.....	29
<b>Figure II.10:</b> Microstructure d'un matériau à gradient de propriétés FGM .....	30
<b>Figure II.11 :</b> Concept des matériaux à gradient de propriétés.....	32
<b>Figure II.12 :</b> Classification des matériaux à gradient de propriétés fonctionnelle .....	32
<b>Figure II.13:</b> Les trois types de matériaux à gradient de propriétés et leurs applications	35
<b>Figure II.14 :</b> Différents types des matériaux à gradients de propriétés .....	35
<b>Figure II.15 :</b> à gauche le schéma d'un FGM à porosité graduée, à droite une image montrant la porosité graduelle d'un os.....	37
<b>Figure II.17 :</b> Géométrie d'une plaque en FGM .....	40
<b>Figure II.18 :</b> Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM .....	41
<b>Figure II.19 :</b> La variation du module de Young dans une structure P-FGM .....	41
<b>Figure II.20:</b> Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM.....	42
<b>Figure II.21 :</b> La variation du module de Young dans une structure S-FGM.....	42
<b>Figure II.22 :</b> Variation du module de Young dans une plaque E-FGM.....	43
<b>Figure III.1 :</b> Comparaison de comportement entre les poutres renforcées et celles non renforcées .....	45
<b>Figure III.2 :</b> Comparaison de comportement entre différents matériaux .....	46
<b>Figure.III.3 :</b> Renforcement par Tissus en Fibres de Carbone TFC d'une poutre en béton armé. ....	46

**Figure III.4 : Renforcement par Tissus en Fibres de Carbone TFC d'une poutre en acier** ..... 47

**Figure III.5 : Différents modes de ruptures de poutres BA renforcées** ..... 48

**Figure III.6 : Schéma typique de poutre en BA réparée par le collage de composite endommagée par flexion et par la rupture de tissu.** ..... 49

**Figure III.7 : Schéma typique de poutre en BA renforcée par le collage de composite endommagée par flexion et par l'écrasement du béton comprimé.** ..... 50

**Figure III.8 : Courbes de charge- flèche pour poutres en BA renforcées et non renforcées** ..... 50

**Figure III.9 : Schéma typique du côté de la poutre en BA réparée par le collage de composite endommagée par cisaillement.** ..... 50

**Figure III.10 : Schéma typique du côté d'une poutre en BA réparée par collage du composite endommagée par séparation d'enrobage en béton.** ..... 51

**Figure III.11 : Schéma typique du côté d'une poutre en BA réparée par collage du composite endommagée par décollement du composite (FRP) à l'extrémité.** ..... 52

**Figure III.12 : Schéma typique du côté d'une poutre en BA réparée par collage du composite endommagée par décollement du tissu à mi- portée.** ..... 52

**Figure IV.1 : Poutre console renforcée par des plaques en matériaux composites.**..... 55

**Figure IV.2 : un segment différentiel de la poutre en FGM renforcée par composite.**..... 56

**Figure IV.3: La comparaison entre le présent modèle et le modèle de Hassaine** ..... 62

**Figure IV.4: L'influence de la longueur  $a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par différents types de composites : (a) Poutre Parfaite (b) Poutre imparfaite** ..... 63

**Figure IV.5: Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive  $t_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par composites : (a) Poutre parfaite, (b) Poutre imparfaite.** ..... 64

**Figure IV.6: Effet de l'épaisseur de la plaque  $t_2$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par composites : (a) Poutre parfaite, (b) poutre imparfaite.** ..... 65

**Figure IV.7:** Effet de coefficient de poisson de l'adhésive  $\nu_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par composites : (a) Poutre parfaite, (b) Poutre imparfaite. .... 66

**Figure IV.8:** Effet de la rigidité de la colle d'adhésive  $E_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par composites : (a) Poutre parfaite ; (b) poutre imparfaite. .... 67

**Figure IV.9:** Effet de la fraction volumique des fibres  $V_f$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par composites : (a) poutre parfaite (b) Poutre imparfaite ..... 68

## Liste des notations

**FRP** : Fiber Reinforced Polymers « polymères renforcés de fibres ».

**GFRP** : Glass Fiber Reinforced Polymer « polymères renforcés de fibres de verre ».

**CFRP** : Carbon Fiber Reinforced Polymer « polymères renforcés de fibres de carbone ».

### *Notations :*

$E_2$  : Module de Young de composites (loi de mélange).

$E_m$  : Module de Young des matrices.

$E_f$  : Module de Young des fibres.

$V_f$  : Fraction volumique des fibres.

$V_m$  : Fraction volumique des matrices.

$t_a$  : l'épaisseur de la couche d'adhésive.

$t_2$  : l'épaisseur de la plaque de renforcement.

$E_a$  : la rigidité de la colle d'adhésive.

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

$b$  : Distance entre le point d'application de la force concentrée et le bord de la plaque.

$b_1$  : Largeur de la poutre.

$b_2$  : Largeur de la plaque composite.

$t_1$  : Hauteur de la poutre.

$\varepsilon_1(x)$  et  $\varepsilon_2(x)$  : Déformations de la poutre et de la plaque composite

$u_1(x)$  et  $u_2(x)$  : Déplacements longitudinaux à la face inférieure de la poutre 1 et à la face supérieure de composite 2.

$y_1$  et  $y_2$  : Distances entre la face inférieure de l'adhérent 1 et la face supérieure de L'adhérent 2 et leurs centres de gravité respectifs.

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

$\sigma_n(x)$  : Contrainte normale.

$M_1(x)$  et  $M_2(x)$  : Moments fléchissant de la poutre 1 et la plaque composite 2.

$E_1$  ,  $E_2$  et  $E_a$  : Modules d'élasticité longitudinaux de la poutre 1, de composite 2 et de l'adhésif.

$I_1$  et  $I_2$  : Moments d'inertie de la poutre 1 et du composite 2.

$A_1$  et  $A_2$  : Sections transversales de la poutre 1 et du composite 2.

$N_1(x)$  et  $N_2(x)$  : Forces axiales de la poutre 1 et de la plaque composite 2.

$V_1(x)$  et  $V_2(x)$  : Efforts tranchants appliqués dans la poutre 1 et dans le composite 2.

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

$K_s$  : Rigidité au cisaillement de la couche d'adhésif.

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

$R$  : Coefficient de proportionnalité.

$M_T(x)$  : Moment de la poutre.

$G_1$  et  $G_2$  : Modules de cisaillement de la poutre 1 et de la plaque composite 2.

$\nu_a$  : Coefficient de poisson de l'adhésif.

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

$w_1(x)$  et  $w_2(x)$  : Déplacements verticaux de la poutre 1 et du composite 2.

$L$  : Longueur de la poutre.

$q$  : Charge uniformément répartie.

## *Résumé*

Dans ces dernières années, l'utilisation des différents types de composites pour la réhabilitation ou renforcement des structures en génie civil est devenue une solution efficace, Cette technique consiste à coller une plaque composite sur l'intrados d'une poutre en raison d'augmenter sa rigidité spécifique et résistance vis-à-vis de la flexion et/ou de l'effort tranchant.

Cependant, le mode de rupture le plus courant de ces poutres renforcées est le décollement de la plaque composite en raison des contraintes d'interface aux bords de cette dernière.

Dans cette étude, un développement analytique et une analyse par méthode d'élasticités sont présentées pour calculer les contraintes d'interface dans la poutre console FGM renforcée par différents types de composites à base des fibres. Les résultats de notre présent modèle ont été validés par comparaison aux résultats des contraintes d'interface issus de la littérature. Une étude paramétrique a été réalisée afin de mettre en évidence l'impact de différents paramètres sur les contraintes d'interfaces.

**Mots clés :** Renforcement, matériaux composites, Contraintes d'interface, Poutre console, FGM (les matériaux fonctionnellement gradués).

## *Abstract*

In these last years, the use of different types of composites for the rehabilitation or reinforcement of structures in civil engineering has become an effective solution, this technique consists of bonding a composite plate to the underside of a beam in order to increase its specific rigidity and resistance to bending and / or shearing force.

However, the most common failure mode of these reinforced beams is the detachment of the composite plate because of a high stress at the edges of this latter. Accurate predictions of such constraints are necessary to provide this failure mode.

In this study, an analytical development and an analysis by elasticities method are presented to calculate the interface stresses in the FGM console beam reinforced by different types of fiber-based composites, the results of this model have been validated by comparison with the results of interface constraints from the literature. A parametric study was carried out in order to highlight the impact of various parameters on the interface constraints.

**Keywords:** strengthening, composite materials, interfacial stresses, console beam, FGM (Functionally Graded Materials).

## ملخص

في السنوات الأخيرة، أصبح استخدام أنواع مختلفة من المركبات لإعادة تأهيل (ترميم) أو تعزيز هياكل الهندسة المدنية حلاً فعالاً، هذه التقنية تنص على إلصاق لوحة مركبة على الجانب السفلي لرافدة من أجل زيادة صلابتها ومقاومتها إزاء الانثناء و/أو قوى القص.

ومع ذلك فإن طريقة الانقطاع الأكثر شيوعاً لهذه الروافد المعززة هو انفصال اللوحة المركبة للدعم بسبب التركيز العالي للإجهادات على حواف هذه الأخيرة.

في هذه الدراسة، تطوير تحليلي ورقمي بواسطة المرونة لحساب الاجهادات في الرافدة المكونة من مواد متدرجة الخصائص معززة بأنواع مختلفة من المركبات القائمة على الألياف، تم التحقق من صحة نتائج نموذجنا الحالي من خلال مقارنتها مع نتائج اجهادات الواجهة المحصل عليها من قبل.

**الكلمات المفتاحية:** التعزيز، المواد المركبة، ضغوط الواجهة، رافدة، مادة متدرجة الخصائص

## *Introduction générale*

Les recherches concernant l'utilisation des matériaux composites dans le renforcement de structure béton armé ont été bien développées et montrent que cette technique est désormais éprouvée. Les études sur des renforcements en flexion des poutres sont très bien documentées. Les techniques de réparation et renforcement par les matériaux composites se caractérisent par leur simplicité de mise en œuvre et leurs efficacité, l'application de ces matériaux pour le renforcement des poutres est récente, et plusieurs études ont été réalisées sur le comportement d'éléments renforcés par ces composites.

Le renforcement par collage externe des plaques composites est l'une des méthodes les plus efficaces utilisées actuellement mais présente un problème qui est le décollement.

Notre présent travail de recherche a donc pour l'objectif de développement d'une solution analytique directe qui couche détermine les contraintes d'interface au niveau de l'adhésif d'une poutre console en FGM réparé par matériaux composite.

Pour cela, notre travail s'articule autour de quatre chapitres :

- Le premier chapitre : Nous décrivons les principales pathologies qui affectent les structures en béton et les techniques de réhabilitations des structures en génie civil.
- Le deuxième chapitre : Nous présentons les matériaux composites d'une manière générale.
- Le troisième chapitre : Est consacrer à présenter les différentes modes de rupture des poutres renforcées par matériaux composites et leur comportement.
- Le quatrième chapitre : sera consacré sur le développement mathématique pour déterminer les contraintes d'interfaces en comparant avec le model de Hassaine Daouadji et montre les études paramétriques qui influant sur le comportement d'une poutre console en FGM renforcée par différents types des composites.

Enfin, nous concluons notre travail par conclusion générale basée sur les résultats obtenus par notre méthode.

# CHAPITRE I

## *Pathologies et techniques de réhabilitations des structures en génie civil*

## I.1 Introduction

L'homme essaie de devenir les lois de la nature pour en faire tout en assurant la sécurité du public et la protection de l'environnement, mais en le maître pas toujours.

Les ouvrages sont nécessaires de notre société, car ce sont des éléments facilitant la vie des usagers. Donc il doit connaître parfaitement les différentes pathologies causant la dégradation des ouvrages, qui peuvent gêner le bon fonctionnement des ouvrages pour une bonne estimation de la durée de vie d'un ouvrage.

La pathologie des ouvrages se manifeste par plusieurs des causes comme la fissuration excessive, la déformation exagérée ou la rupture d'éléments, ces phénomènes provoquent l'apparition des désordres et dégradations dans les ouvrages. Afin de retarder ou bien limiter les nouvelles pathologies similaires, il est possible de protéger la structure. En effet, cette étape est nécessaire pour connaître le choix de technique et les principes de bases d'une réhabilitation des structures en génie civil.

## I.2. Pathologies et principales causes des désordres affectant les ouvrages en génie civil

La révision approfondie de la littérature [9,10] concernant les origines des pathologies des constructions montre que celles-ci peuvent classées en quatre groupes essentiels (voire la figure ci-dessous):

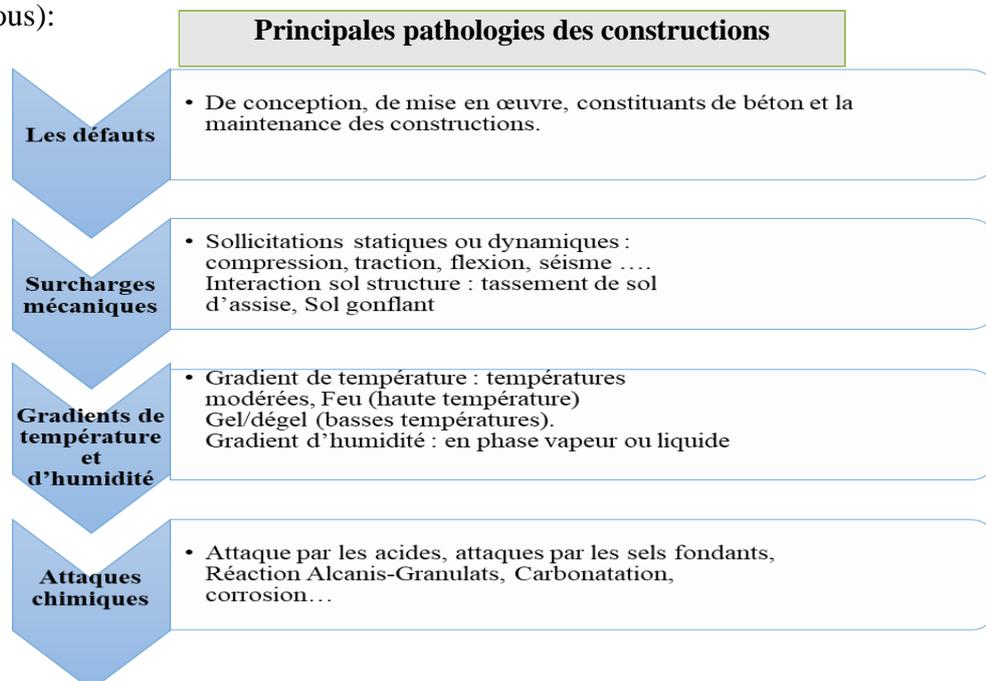


Figure I.1 : Organigramme de Principales Pathologie des constructions [09]

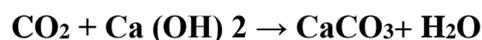
### ***1.2.1. Causes chimiques de dégradation***

Les détériorations du béton armé dues aux attaques chimiques sont résultent des réactions dissolution/ précipitation qui se produisent lorsque les éléments agressives (eau de mer, acide sulfates, chlorures, nitrates et les eaux usées), viennent en contact avec les hydrates de ciment et les aciers d'armatures. Les paramètres qui régissent ces phénomènes sont fonction de la chimie et la minéralogie du béton, sa microstructure (perméabilité, diffusivité) et les conditions environnementales (température, humidité, O<sub>2</sub>, Co, Co<sub>2</sub>) [1].

#### ➤ ***La carbonatation***

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui concerne tous les bétons. Elle correspond à une transformation progressive d'essentiellement un des composés du béton durci, la Portlandite, en calcite au contact du dioxyde de carbone contenu dans l'air et en présence d'humidité. Cette transformation s'accompagne d'une diminution du pH (le béton sain a un pH d'environ 13, ce qui constitue un milieu protecteur pour les armatures en acier et permet la formation d'une couche d'oxydes passifs. Une des conséquences principales de la carbonatation est de favoriser la corrosion des armatures, lorsque le front de carbonatation les atteint [1]

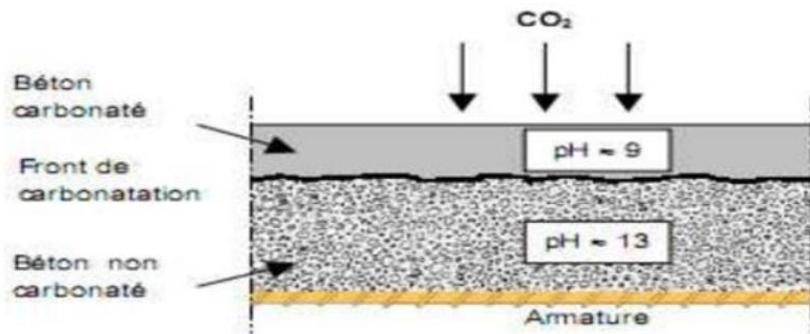
Il correspond à la réaction du CO<sub>2</sub> avec tous les hydrates du ciment et plus particulièrement avec la chaux hydratée, généralement, on peut Schématiser cette réaction de la manière suivante :



Pour protéger le béton contre la carbonatation il faut le confectionner à faible rapport E/C pour réduire la porosité du béton, et assurer un enrobage suffisant (qui peut être complète par enduit) [2].

La carbonatation provoque une baisse du PH et la dépassivation de l'acier d'armature. En outre, la vitesse de celle-ci est maximale pour une humidité comprise entre 40% et 80%. Donc, pour un environnement sec, la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre le CO<sub>2</sub>.

On peut mesurer la profondeur de carbonatation par un essai de coloration à la phénolphthaléine (voir la figure ci-dessous)



*Figure I.2 : Progression de la carbonatation [2]*

➤ **Réaction alcali-granulat**

Le terme alcali-réaction désigne un ensemble de réaction chimique qui se produit entre la solution interstitielle du béton alcaline, et certaines phases, réactives des granulats. Lorsqu'un béton contenu une concentration en alcalins excédant un seuil critique et le taux d'humide (vers 80%), l'alcali-réaction peut provoquer durant quelques années : gonflement, fissuration et chute des performances mécaniques du béton attaqué (voir la figure ci-dessous). On distingue trois types d'alcali-granulats qui sont les suivant [1] :

- Réaction alcali-silice → les plus fréquentes,
- Réaction alcali-silicate,
- Réaction alcali-carbonate.

L'apparition des désordres peut se faire à moyen terme (7 à 8 ans) ou à long terme (15 à 40 ans).

Les manifestations visibles sur l'ouvrage sont principalement [4] :

- ✚ **Fissuration** : en l'absence de contrainte, le maillage observé est polygonal alors qu'en présence de contraintes, les fissures sont plutôt orientées parallèlement à la direction des contraintes majeures. La largeur des fissures est généralement inférieure à 10 mm, Leur ouverture varie selon la cinétique de la réaction de 0,5 à 1mm/an et leur profondeur n'excède généralement pas 50 mm
- ✚ **Déformations** : L'expansion est l'une des principales conséquences de l'alcali réaction. La vitesse d'expansion est comprise en général entre 0,02 et 0,2 mm/m/an mais les armatures limitent l'expansion des bétons armés. Elle peut se traduire localement par l'apparition de cône d'éclatement dus aux contraintes particulières engendrés par les granulats réagissant près de la surface ;



*Figure I.3 : Fissures causées par la Réaction Alkali-Silice rapporté par Mehta [3].*

➤ *Attaque par les Sulfates*

Généralement, l'attaque par les sulfates peut détériorer fortement le béton dans une durée relativement courte, les sulfates proviennent essentiellement du milieu extérieur. Ces ions ne sont pas passif vis-à-vis de la matrice cimentaire et conduisent à la formation de certains composés chimiques expansifs tels que : L'étringite, le gypse et la thaumasite. Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations [5]



*Figure I.4 : Exemple de l'attaque par l'acide sulfurique dosé à 5% pour un béton ordinaire durant quatre mois [6]*

Les sulfates sont généralement retrouvés dans :

- Les eaux de mer.
- Les eaux souterraines.
- Les sols.
- Les milieux agricoles.
- Les eaux usées (domestiques et industrielles).

- Certaines industries.

Les produits les plus sensibles à l'attaque des sulfates sont : l'aluminat et la portlandite il y aura formation de sels expansifs d'ettringite (jusqu'à 400% de pouvoir d'expansion).

Les facteurs influençant l'attaque par le sulfate [7] :

- La teneur en  $C_3A$  et  $C_4AF$  (qui peut réagir avec les sulfates).
- La teneur en  $Ca(OH)_2$ .
- La nature du ciment.
- La perméabilité du béton.
- La concentration des sulfates.
- La température de l'eau : la chaleur accélère la cinétique des réactions
- La cure.
- La fluctuation de l'attaque.
- La présence de l'eau (qui favorise la formation de solution agressive).
- L'abrasion.

➤ *Attaque par des acides*

Les acides ( $pH < 7$ ) attaquant le béton par dissolution de la portlandite en premier et la C-S-H :

- Il y a possibilité d'attaque si  $pH < 6.5$
- Attaque sévère si  $pH < 5.5$ .
- Attaque très sévère si  $pH < 4.5$

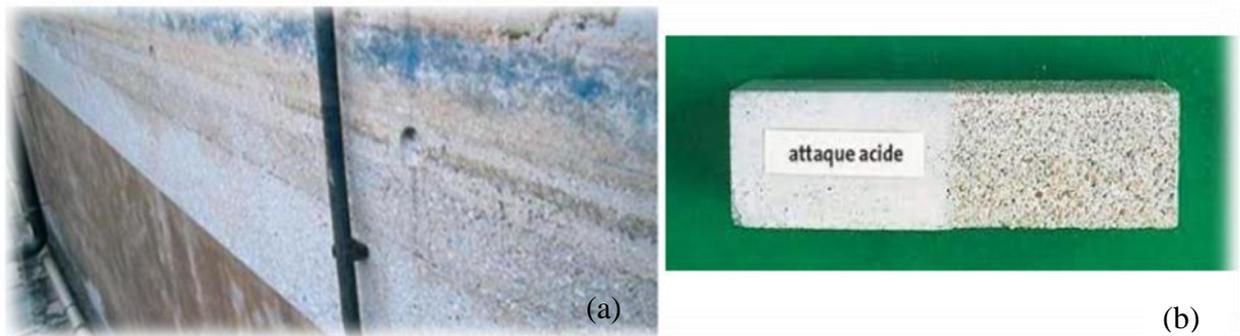
Il y a deux types des acides agressifs :

- Inorganiques : carbonique, chlorhydrique, fluorhydrique, nitrique, phosphorique, sulfurique
- Organiques : acétique, citrique, formique, humique, lactique, tannique.



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. [8]



*Figure.I.5 : (a) Attaque de la surface d'un bassin de station d'épuration, (b) Prisme de Mortier dont la partie de droite a subi l'attaque d'un acide. [2].*

➤ **Corrosion des armatures**

Une étude effectuée en Angleterre a montré qu'entre 1974 et 1978, la corrosion des aciers d'armature a été la cause directe de l'effondrement d'au moins 8 structures de béton. Les dommages dus à la corrosion se manifestent par des expansions qui conduisent à la formation de fissures qui provoquent le décollement de l'enrobage des armatures d'acier. Ci-dessous, nous montrons quelques exemples des structures en béton armé exposés à l'action de corrosion [11].



*Figure.I.6 : Corrosion avancée des armatures des poutrelles. [12].*

La vitesse de corrosion des barres d'armatures est plus grande en présence de chlorures (l'eau de mer, sel...) [7].

Les chlorures ont deux effets dans les mécanismes de corrosion :

- Ils diminuent la résistivité de l'électrolyte (le couverte de béton), ce qui facilite le transport des ions d'un site à l'autre.

- Ils permettent l'amorçage plus rapide de la corrosion en dé passivant la couche superficielle (dissolution de la couche passive ou migration des chlorures à travers le film d'oxyde).

### ***1.2.2. Causes physiques de dégradation***

**Séisme** : Se référer aux codes de calcul dans les zones sismique, limiter le degré d'endommagement par des mesures constructives.

**Incendie** : Le béton a une résistance au feu convenable en cas d'incendie En 1h la température est de 350°C à une profondeur de 3 cm vis-à-vis de la couche superficielle du béton, et à une profondeur de 7.5 cm elle est de 100°C.

- A 570°C : fissuration des granulats quartzeux.
- A 800°C décarbonatation du CaCO<sub>3</sub>.
- La vaporisation brutale de l'eau implique un éclatement du béton.

**Cycle gel/ dégel** : Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de montagne, des chambres froides. [13]



**Figure.I.7** : Effet du gel-dégel sur le béton : écaillage du béton d'enrobage et corrosion des armatures. [14]

### ***1.2.3. Causes mécaniques de dégradation***

#### **a) Erreurs de conception et d'exploitation**

Dans le cas des structures de grandes surfaces, il est important de prévoir un drainage adéquat pour limiter les accumulations d'eau et de sels fondants.

Les différentes erreurs de conception peuvent être résumées comme suit :

- Un tassement
- Une poussée à vide dans les escaliers.
- Une surcharge que la structure ne peut subir.
- Un manque de joints.
- Un manque d'armatures.

#### **b) Défauts d'exécution**

Le défaut d'exécution sont dus généralement à :

- Une mauvaise position des armatures d'aciers.
- Une mauvaise mise en œuvre du béton.
- Un mauvais coffrage.
- Une mauvaise formulation du béton.
- Un recouvrement insuffisant des armatures d'aciers.

#### **c) Les chocs**

Le phénomène de choc peut provenir de :

- Les chocs des véhicules sur ponts.
- Les chocs de bateaux sur piles.
- La mauvaise manutention d'éléments préfabriqués.

#### **d) L'abrasion**

Le phénomène d'abrasion est dû généralement à :

- Une circulation intense de l'eau (barrages),
- Les charges mécaniques répétées (chaussées, dallage industriel),
- L'action du courant d'eau sur corps immergés ou flottants (piles de ponts, plateforme, etc.).

#### **e) Les fissures**

Les différents types de fissures sont :

- Les fissures mécaniques (due à la compression, à la traction, à la flexion ou au Cisaillement).
- Les fissures dues au retrait (un retrait plastique, un retrait thermique, etc.).
- Les fissures dues au gel.
- Les fissures dues à la corrosion [15].



*Figure.I.8 : Fissuration du béton [16].*

### **I.3. Différentes technique réhabilitations des structures en génie civil**

Au cours des dernières années, d'importantes études ont été entreprises dans le monde des quartiers anciens. Elles ont conduit à la création de secteurs sauvegardés, à la protection des centres villes et à la réhabilitation du patrimoine bâti qui est devenu un marché important de la construction.

Cependant, l'opposition "rénovation ou réhabilitation" est toujours présente, car pour de nombreux maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre, il est plus facile de démolir et de reconstruire que de restaurer. On prétend aussi que la rénovation coûte moins cher que la restauration. En fait, le choix relève de nombreux facteurs : techniques, économiques, sociaux, historiques, esthétiques, etc.

#### ***1.3.1 Définition de renforcement***

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier (augmentation de la ductilité, de la résistance) d'une construction pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre des sollicitations dont il n'a pas été tenu compte dans les calculs [17]. Un renforcement peut être associé à une réparation.

### ***1.3.2 Définition de Réparation***

La réparation d'une structure est une opération qui consiste à lui restituer, par des travaux appropriés, un niveau de service perdu, la baisse du niveau de service peut résulter de toutes sortes de causes ; les plus fréquentes sont la dégradation progressive des matériaux (agressions atmosphériques, modification des propriétés des matériaux), l'utilisation intensive (effet de répétition des charges) voire abusive (utilisation au-delà des charges prévues), les accidents et sinistres (incendies, choc ,séisme, ...) [17].

- ***Préparation d'une opération de réparation ou de renforcement***

Pour savoir si une structure est réparable, il faut donc commencer par dresser un état détaillé et précis des désordres qui sont apparus, s'efforcer d'en déterminer les causes, estimer l'intensité des charges que la structure est encore en état de supporter (dans le but de prendre le plus rapidement possible d'éventuelles mesures de protection) et enfin procéder à l'étude des moyens propres à lui restituer ses caractéristiques de résistance initiale.

Quand la cause de dégradation a été déterminée et que l'on a vérifié la résistance de l'ouvrage il faut décider :

- Soit de laisser la dégradation se poursuivre ;
- Soit de renforcer la construction ;
- Soit de reprendre des mesures pour conserver l'ouvrage dans son état actuel sans essayer de le renforcer ;
- Soit – si la dégradation est exceptionnellement avancée – de reconstruire ou éventuellement d'abandonner l'ouvrage.

Cette décision est prise en fonction de facteur de sécurité, d'économie et d'esthétique.

Le choix d'une méthode de réparation n'est pas facile ; il s'agit de choisir le procédé le moins coûteux qui atteigne efficacement le but poursuivi [18], [19].

### ***1.3.3. Réhabilitation***

Englobe l'ensemble des actions en vue de récupérer et d'améliorer un édifice en l'adaptant à un usage de confort moderne [20].

L'objectif fondamental consiste à éliminer les anomalies constructives ou fonctionnelles accumulées au cours du temps, à moderniser installations, équipements et organisation des espaces, améliorant ainsi son fonctionnement et le préparant à une utilisation actuelle [21].

***1.3.3.1. Techniques de réhabilitation***



***Figure I.9 : Renforcement d'une poutre par adjonction d'armatures additionnelles en sa partie inférieure [21].***

Plusieurs types de réhabilitation existent [22] :

- Les injections
- Projection du béton armé de 6 cm à 10 cm d'épaisseur
- Pose des éléments préfabriqués

➤ ***Injections de collage***

Le but de ce procédé est d'améliorer les caractéristiques mécaniques du milieu traité et de rétablir la liaison de l'ouvrage avec le terrain en traitant l'interface sol/structure. L'injection est un procédé largement utilisé dans les travaux de réhabilitation des ouvrages dont les caractéristiques mécaniques sont très faibles (Fig. I- 10). Le procédé consiste à injecter dans le sol, à l'aide d'une technique appropriée, à partir des forages, un coulis dont la composition (ciment, bentonite, adjuvants, eau ...) et les caractéristiques sont bien déterminées, suffisamment fluide pour pénétrer dans le réseau poreux du sol [22].



***Figure I.10 : mise en place des canules d'injections [22].***

➤ **Projection de béton armé**

Un béton projeté est constitué d'un mélange de granulats, de ciment et d'eau et projeté à l'aide d'air comprimé. Le but de ce procédé est d'améliorer la résistance mécanique de l'ouvrage en place. Il faut distinguer deux techniques de projection (Figure I.10), suivant le moment d'introduction de l'eau dans la chaîne :

- Voie sèche : sans ou avec pré-mouillage. L'eau ne sera introduite qu'au niveau de la lance (voie sans pré mouillage), ou bien plus en amont dans la conduite de transport (voie avec pré mouillage). Cette technique est couramment utilisée dans les ouvrages d'assainissement.
- Voie mouillée : à flux dense ou à flux dilué. L'eau est introduite au malaxage du béton. Pour le flux dense, on introduit l'air comprimé à l'extrémité de la conduite de projection, et pour le flux dilué, on introduit l'air comprimé à la sortie de la machine.

Les inconvénients majeurs de cette technique sont la réduction de la section hydraulique, la corrosion des armatures avec le temps et le flambement de l'acier (Figure. I.11).

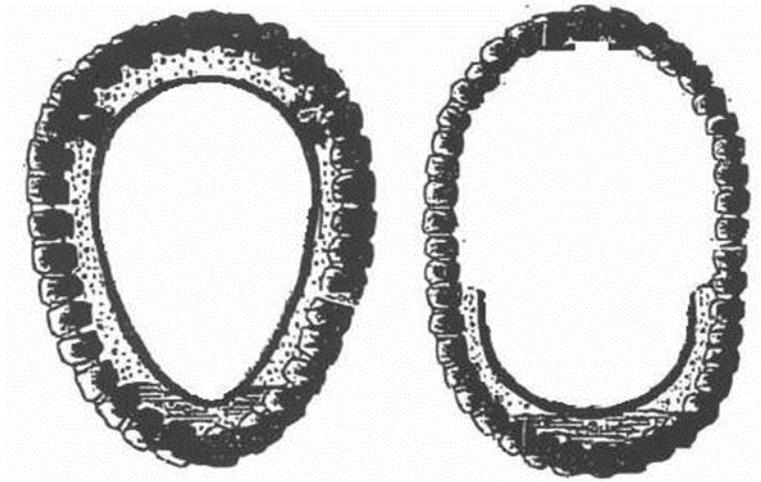


*Figure I.11 : ouvrage renforcé par béton projeté [23]*

➤ **Éléments préfabriqués**

Afin d'améliorer et de rétablir les performances de l'ouvrage, des éléments préfabriqués sont mis en place sur tout ou partie de la section (Figure I.12). Cette technique est composée de deux phases : la mise en place d'éléments préfabriqués rigides ou flexibles puis la mise en œuvre d'un matériau de blocage entre les éléments préfabriqués et l'ouvrage existant. Les éléments de coques préfabriqués destinés à la réhabilitation par tubage avec ou sans espace annulaire comprennent :

- Des coques entières de formes circulaires ou non,
- Des cunettes ou coques partielles.



*Figure I.12 : Principe de réhabilitation par coque complète et partielle [24].*

Le système de coques préfabriquées est utilisé pour des rénovations sans tranchée, d'ouvrages visitables ou non notamment en brique, ciment, meulière, béton armé ou non et assurant le transport d'eaux pluviales, usées ou industrielles. Les ouvrages réhabilités peuvent être préfabriqués ou non et de sections variables, normalisées ou non. Après préparation de l'ouvrage à réhabiliter, la mise en place des coques PRV est effectuée selon les règles précises et comprend au minimum les phases suivantes (Figure I.13) :

- Calage et étaielement selon les recommandations en prenant soin d'en respecter le nombre, l'emplacement et de ne pas déformer ou abîmer les coques ;
- Remplissage du vide annulaire par injection de coulis ;
- Fermeture des trous d'injection à l'aide des bouchons livrés à cet effet ou par scellement à l'époxy des carottes récupérées lors du perçage ;
- Injection du vide annulaire à l'aide d'un coulis à base de ciment. L'injection s'effectue à débit et pression contrôlée et en plusieurs phases. Dans certains cas un étaielement intérieur vertical et/ou horizontal peut s'avérer nécessaire.

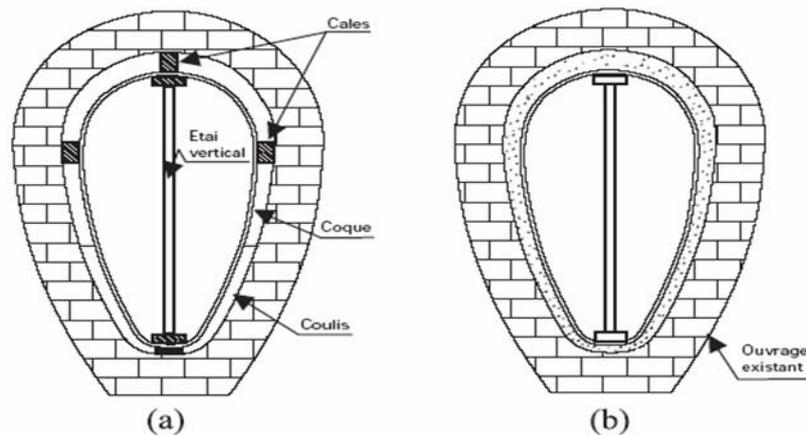


Figure 1.13 : principe de calage de coques complètes avec étau vertical [24].

## I.4 Méthodes de réparation structurales

Les réparations structurales peuvent être effectuées soit par ajout de forces ou de matière, dont la solution retenue pour renforcer ou réparer un élément doit satisfaire ces conditions :

- Le monolithisme de l'élément doit être réalisé, afin de permettre un fonctionnement mécanique satisfaisant.
- Les qualités des matériaux d'adjonction doivent être au moins égales à celles des matériaux constitutifs de l'ouvrage à renforcer ou à réparer. [24].

### I.4.1 Réparation par les plats métalliques

Ce type de renforcement consiste à pallier les insuffisances locales ou globales des structures en béton par des tôles d'acier, collées en surface du béton. Cette surface de béton doit subir avant tout, une préparation soignée ayant pour objet d'éliminer de la surface toutes les parties peu adhérentes et de supprimer les imperfections locales afin de la rendre la plus plane possible.

#### ➤ Les matériaux utilisés

La colle : c'est une résine époxy choisie pour ses propriétés d'adhérence sur l'acier ainsi que sur le béton. Le film résiduel de la colle doit être de faible épaisseur et d'une rigidité suffisante pour transmettre intégralement par adhérence les efforts à la tôle. Cette rigidité étant réduite par une augmentation de température, des précautions spéciales doivent être prises dans le cas de structures soumises à des températures élevées.

La colle n'apporte pas de résistance mécanique, mais doit transmettre les efforts.

La tôle : les tôles d'aciers sont généralement de qualité courante, leur épaisseur est limitée à 3mm de façon à leur permettre de suivre les courbures du support. Si des sections d'acier plus importantes sont nécessaires, il est préférable de superposer des tôles plutôt que d'augmenter l'épaisseur dans le but d'épouser l'allure de la déformée de la section de béton renforcé (exemple : ressorts à lames des camions) [25].

Le schéma suivant présente de manière simple les détails du renfort :

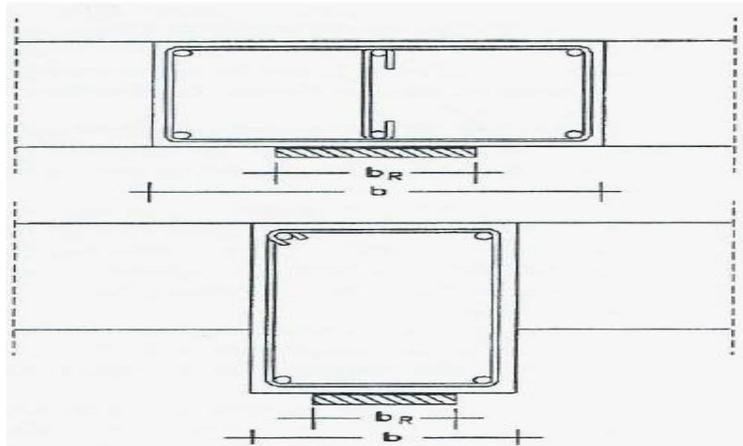
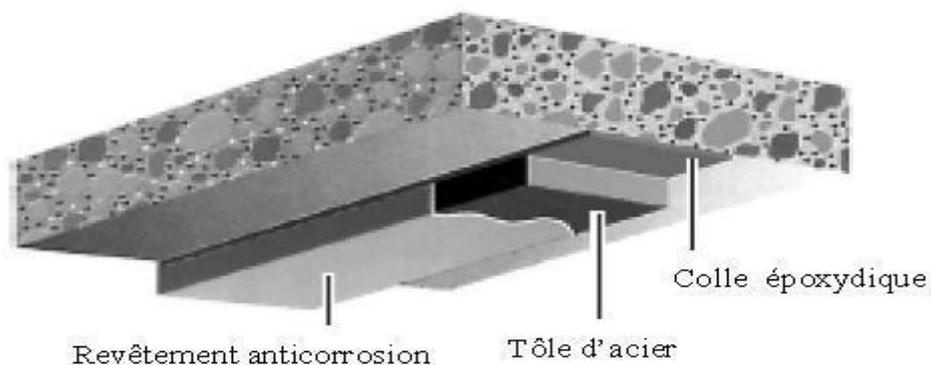


Figure I.14 : renfort par plaque d'acier [26].

- Pour parvenir à des fins de mise en œuvre correcte, il est impérativement souhaitable à procéder à un sablage, permettant une préparation d'une grande surface de collage, sans attaquer en profondeur les parements.
- Un mortier de ragréage est destiné à pallier, dans certains endroits, le manque d'enrobage des armatures internes ou bien à replanir les surfaces, sans pour autant dépasser les 20% des surfaces destinées au collage.
- La colle est généralement une résine époxy choisie pour ses propriétés d'adhérence à l'acier et au béton. Une attention particulière doit être accordée aux conditions atmosphériques environnant le site lors de la mise en œuvre des tôles.
- La colle n'apporte pas de résistance mécanique, mais transmet fortement les efforts
- Les tôles ou platines de renfort, constituées, dans la plupart des cas, de tôles en acier. Ces tôles possèdent une épaisseur de 3 à 5mm et doivent subir toute leur préparation en usine (découpage- pré assemblage si besoin, abattage des arrêtes ainsi qu'un éventuel sablage) pour avoir une bonne tenue de l'adhérence entre l'acier et la colle.
- Les tôles doivent être protégées en utilisant une pellicule, de même nature que celle qui doit être appliquée avant collage.

- La protection des aciers contre la corrosion sur leur face visible doit être assurée. En fin des travaux les aciers doivent être protégés contre la corrosion.
- Après l'enlèvement de vernis de protection ou de primaire de protection, la colle est étalée sur tôle et sur la surface du béton l'épaisseur minimale mise en œuvre sur chaque face est de l'ordre du millimètre.
- Le dispositif de serrage peut, suivant le cas, être constitué de serre-joints, de barres filetées transvasant l'élément à renforcer, doit permettre d'appliquer sur toute la tôle une pression voisine de  $4 \text{ N/mm}^2$  durant toute la durée de polymérisation de la colle.



*Figure I.15 : Application de plats métalliques selon le procédé L'Hermitte [27].*



*Figure. I.16 : Tôles collées ; (a) difficulté de manutention ; (b) Renforcement du viaduc de terre noire par tôles collées perforées -Brevet Freyssinet- [28].*

#### ***1.4.2 Réparation par matériaux composites***

La technique de collage de matériaux composites n'est pas applicable directement aux ouvrages d'assainissement en maçonnerie du fait de l'irrégularité du support. En effet, la meulière est un matériau très hétérogène. Il est nécessaire de valider la réalisation d'un chemisage mince par mortier fibré ayant les caractéristiques nécessaires pour transmettre les efforts de la maçonnerie aux matériaux composites sans avoir de décollement prématuré du complexe mortier fibré/renforcement [29].



*Figure I.17 : Ouvrages en béton armé renforcées par des tissus de par matériaux composites [30]*



*Figure I.18 : Voûte renforcée par carbone. [30]*



*Figure I.19 : Renforcement de structure en BA par matériau composite [30]*

➤ *Les avantages de l'utilisation de composites*

Les matériaux composites sont habituellement employés pour la réparation ou le renforcement d'ouvrages. En effet, compte tenu de leurs propriétés mécaniques très élevées, les composites permettent de renforcer des éléments de structure. Le choix du renfort utilisé pour le composite se porte généralement sur les fibres de carbone puisqu'elles présentent une bonne résistance à la traction et à la compression, et un module d'élasticité assez élevé [31].

## **I.5. Conclusion**

Nous avons vu que le passage du temps laisse sa trace sur les structures que ce soit physique, mécanique ou chimique pouvant causer leur détérioration, donc il faut le réparer.

C'est l'étape clé qui permet de déterminer le choix de la méthode techniques de réhabilitations d'une structure en génie civil.

Ainsi que des différents moyens et les procédés utilisables disponibles pour le réaliser et d'augmenter la rigidité pour résister aux charges appliquées.

*Chapitre II*

*Généralité sur les  
matériaux avancés*

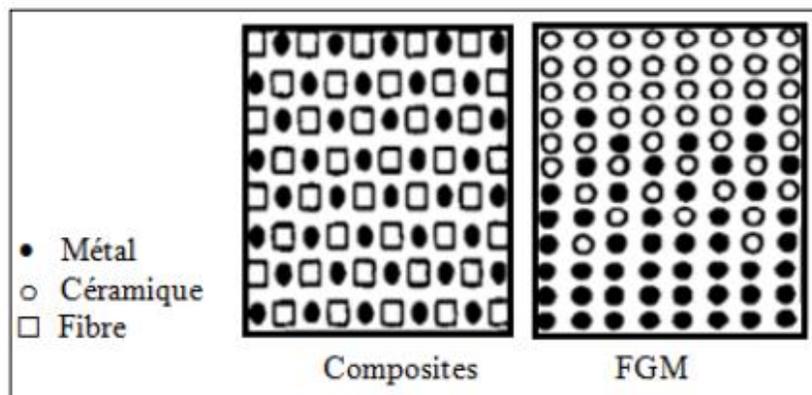
## II.1. Introduction

La recherche de performances techniques alliées au besoin d'optimisation a également motivé la conception de matériaux spécifiques adaptés à la solution technologique des problèmes à résoudre et permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements. Ainsi des matériaux renforcés à hétérogénéité de structure maîtrisée appelés matériaux composites

Le développement des matériaux composites a permis de leurs associer des propriétés spécifiques au sein d'une même pièce, alors ils sont une classe de matériaux avancés, Ils sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de forme.

Le matériau composite ne peut pas répondre efficacement dans certains environnements. Il S'endommage dans des conditions de travail extrêmes de haute température par un processus appelé décollement. Contrairement aux métaux, la céramique a d'excellentes propriétés thermiques.

Pour résoudre ce problème, Le concept de matériaux à gradient de propriétés (FGM) a conduit au développement de matériaux présentant des caractéristiques spéciales dans le laboratoire national d'aérospatial du Japon en 1984 par M. Niino et ses collègues à Sendai., L'idée est de réaliser des matériaux utilisés en raison des avantages de diminuer la disparité dans les propriétés matérielles et de réduire les contraintes thermiques.



*Figure II.1 : Configurations des composites et des FGM*

## II.2. Généralité sur les matériaux composites à base de fibres

Les matériaux sont considérés comme un axe de recherche très important. Depuis la nuit des temps, le moteur de la découverte de nouveaux matériaux a plus ou moins obéi à une double démarche

Leur association est complémentaire et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue appelée matrice. [32]

De nos jours, l'utilisation des ressources renouvelables dans les matériaux composites devient de plus en plus fréquente. Ces matériaux possèdent la capacité de se renouveler naturellement (leur utilisation est devenue une nécessité, avec l'épuisement des ressources fossiles, l'émission des gaz à effet de serre et le problème de la gestion des déchets, il est indispensable de trouver des solutions pour le respect de l'environnement). Parallèlement, l'industrie plastique est en pleine expansion. C'est dans ce cadre, que de nouveaux matériaux, résultant du mélange de ses constituants provenant de la biomasse avec les matériaux plastiques, de plus en plus performants sont mis au point. Ces matériaux ont l'avantage d'être biodégradables, renouvelables, aux fibres synthétiques (verre, carbone, aramide, ...)

### II.2.1. Définition des composites à base de fibres

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux différents et non miscibles, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs [33]

#### ➤ *Matériaux composites fibreux*

Pour ces types de matériaux les renforts sont des fibres dont les formes géométriques (continues ou courtes) varient suivant le type d'application. L'anisotropie est très prononcée dans ce cas puisque toutes les fibres sont orientées dans la même direction. Les renforts en fibre sont de nature variée et le choix de leur utilisation dans les applications dépend de leur performance et du coût de leur fabrication. Les fibres les plus rencontrées dans les composites sont les fibres de verre qui ont un prix compétitif, une disponibilité et une résistance élevées.

Ensuite, vient les fibres en carbone qui sont plus utilisées dans les matériaux à haute performance mais leurs prix restent relativement excessifs.

On peut citer également les fibres d'aramides qui sont de la catégorie des fibres polyamides aromatiques avec une bonne résistance et une rigidité supérieure à celle des fibres en verre. Comparées aux fibres de carbone, elles ont une résistance en compression et une cohésion fibre-matrice plus faible.

Les matériaux utilisés comme renforts présentent de bonnes propriétés mécaniques intrinsèques (carbone, alumine, silice, bore, kevlar. Acier, nitrure et carbure de silicium...). Les renforts continus ou fibres longues procède un diamètre qui varie selon leur nature, entre quelques micromètres et une centaine de micromètres.

Selon l'application envisagée, l'assemblage de ces fibres longues peut être unidimensionnel (plis unidirectionnels). Bidimensionnel (plis tissés, mats à fibres coupées de quelques centimètres ou à fibres continues) ou tridimensionnel (tissus multidimensionnels).

Les matrices polymères renforcées par des fibres de verre, sont employées dans les produits de grande diffusion, et possède une grande importance. Les fibres de carbone et de kevlar sont utilisées dans pour des applications plus spécifiques de hautes performances telles que l'aéronautique et l'aérospatiale. D'autres types de renforts sont employés tels que des billes (verre, élastomère ...) et des charges (fibres broyées, écailles, poudres...). L'utilisation des (CMP) reste limitée au domaine de températures inférieures à 200°C, [34].

### ➤ **Renforts**

C'est le principal porteur constitutif dans le composite (forme, volume). Il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté. Ces renforts permettent également d'améliorer certaines des propriétés physiques : comportement thermique, tenue en température, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont des propriétés mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une facilité de mise en œuvre, un faible coût [35]

En fonction de leur utilisation, les renforts peuvent être d'origines diverses comme il est indiquée sur la figure II.2.

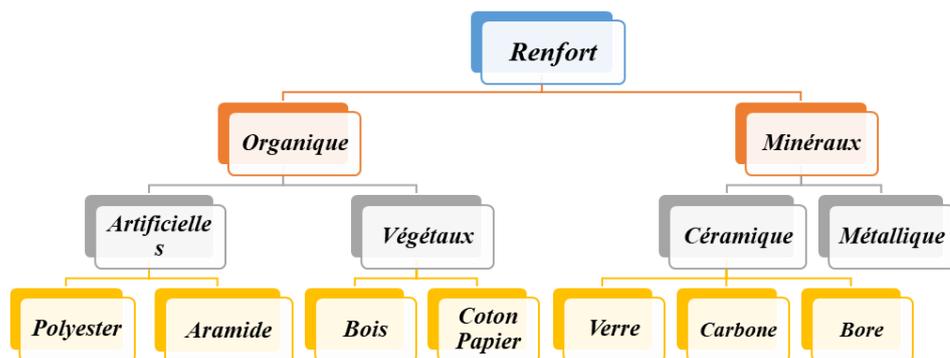


Figure II.2: Les différents types de renfort de base. [36]

➤ **Renfort en fibres discontinues**

Des fibres courtes, ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudre), permettent d'améliorer certaines propriétés de la matrice (résistance à l'usure, propriétés thermiques, poids). Celle-ci reste l'élément de base et on obtient alors un « polymère renforcé ».

➤ **Renfort continu**

Sous forme de fibres longues qui sont généralement utilisées pour des composites HP. Cette forme fibreuse offre une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevée que ceux du même matériau massif, avec une augmentation de la longueur de 10000 fois, ou bien pour le même volume, la surface est multipliée par 100 dans le cas des fibres de verre [37]

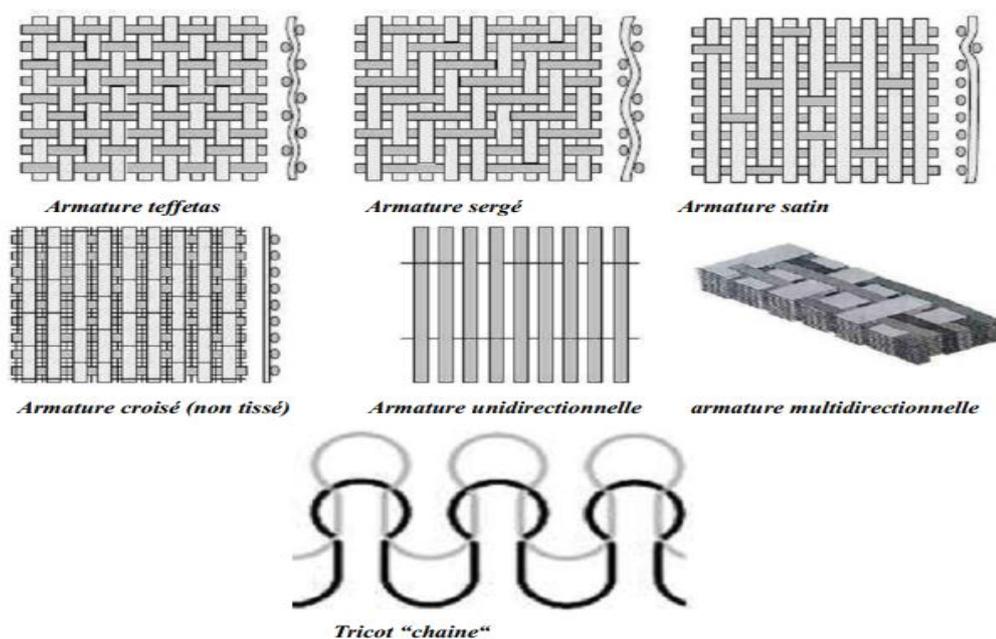


Figure II.3 : Différentes formes de renforts continus [38]

### *II.2.2. Les différents types de composites*

Les fibres sont composées de plusieurs filaments élémentaires dont les diamètres varient de 5 à 25  $\mu$ . Les lois de comportement des fibres sont de type fragile.

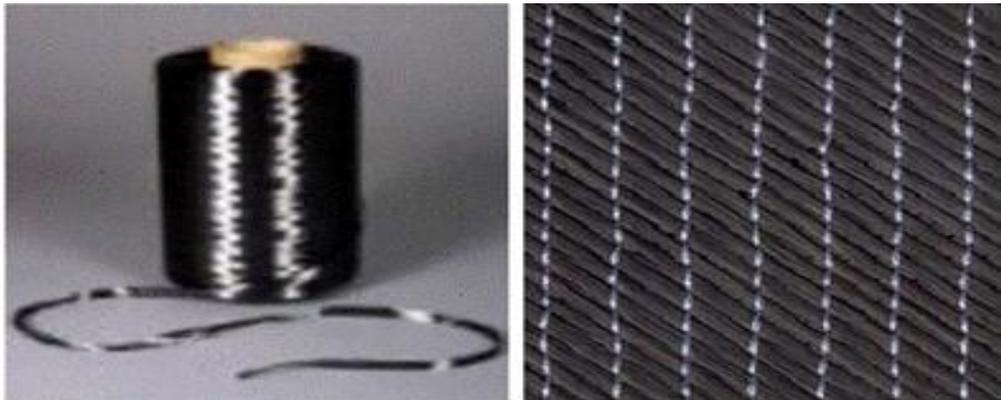
Dans le domaine du génie civil, les principales fibres utilisées sont les fibres de Carbone, de Kevlar et de Verre. [39]

#### ➤ *Les fibres de carbone*

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Doivent leurs propriétés à la très forte anisotropie des cristallites de graphite qui les composent. Elles sont fabriquées à partir de fibres de polymère (par exemple polyacrylonitrile) préalablement tissées, et carbonisées sous tension en plusieurs étapes, oxydation (100 à 200 C°), puis pyrolyse (1500-2500 C°). On distingue deux types de fibres (figure II.4) :

-fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;

-fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.



*Figure II.4 : Différents types des fibres de carbone [39].*

#### ➤ *Les fibres de Verre (GFRP)*

Il existe une multitude de fibres de verre dont les propriétés dépendent de leur composition. Actuellement, trois types de fibres de verre sont commercialisés sous forme de files. Ce sont les variétés E, S et R. Ces deux dernières sont très voisines (l'une est Américaine et l'autre est Française). [39]

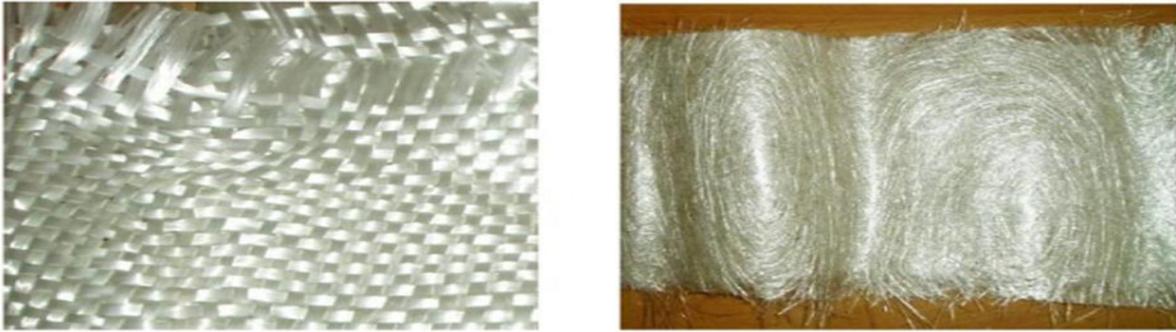


Figure II.5: Fibre de verre [40]

Les propriétés de ces fibres sont représentées dans le tableau II.1 ci-dessous :

Tableau II.1: Propriétés des fibres de Verre [39].

PROPRIETES EN TRACTION	VERRE E	VERRE S	VERRE R
$R_t$ (MPa)	3 400	4 900	4 400
$E_{oT}$ (MPa)	73 000	87 000	86 000
$A_R$ (%)	4.9	-----	5.2
Masse Volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2.54	2.54	2.55

La figure II.6, ci-après, compare la résistance en traction des différentes catégories de fibres utilisées pour les structures en génie civil. Cependant pour le renforcement, les composites à fibres de carbone se sont imposés par leurs caractéristiques mécaniques.

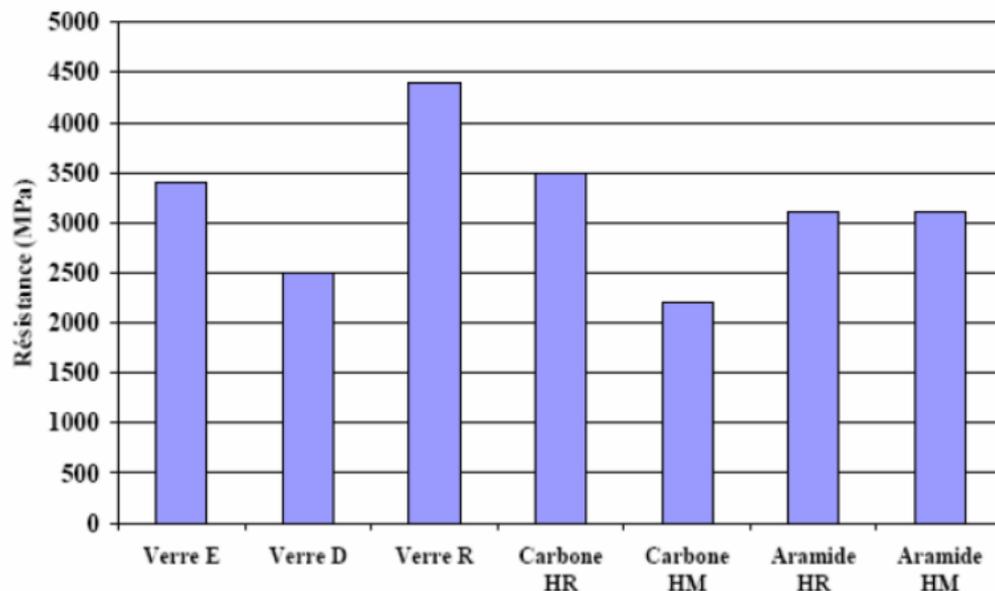


Figure II.6: Histogramme des résistances à la rupture en traction des différentes catégories de fibres [39]

➤ **Les fibres d'aramides (KEVLAR)**

Les fibres de Kevlar sont des fibres synthétiques est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Actuellement, il existe deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

- Les fibres de bas module (29) : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles
- Les fibres de haut module (49): employées dans le renforcement pour les composites hautes Performances.

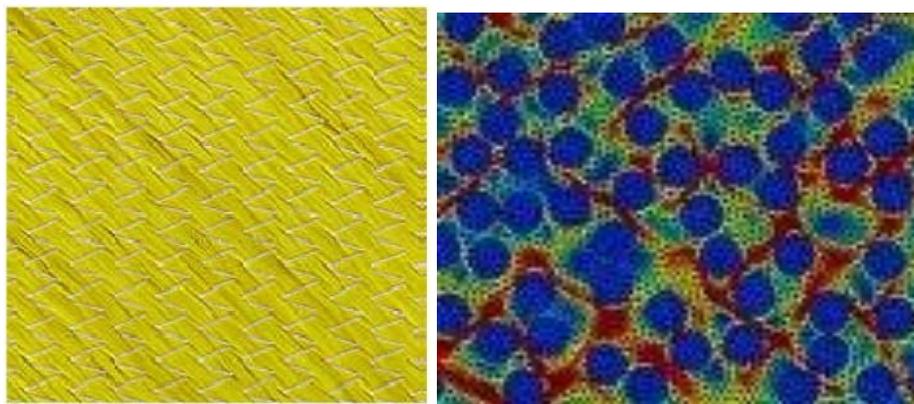
Les propriétés physiques et mécaniques de ces deux types de fibres sont représentées dans le tableau II.2 :

*Tableau II.2: Propriétés des fibres de Kevlar [39]*

PROPRIETES EN TRACTION	KEVLAR 49	KEVLAR 29
$R_t$ (MPA)	3000	2700
$E_{oT}$ (MPA)	120 000 à 130 000	60 000
$A_R$ (%)	2.1	4
Masse Volumique ( $g/cm^3$ )	1.45	1.44

Où  $R_t$  : Résistance à la rupture;  $E_{oT}$  : Module de Young;  $A_R$  : L'allongement à la rupture.

De même que pour les fibres de carbone pour la dilatation thermique, les fibres de Kevlar présentent la même particularité dans le sens de fibres.



*Figure II.7 :différents types des fibres d'aramide [39].*

➤ **Fibre de bore**

Elles peuvent être noyées sans difficulté dans des matrices métalliques et également organiques. Pourtant leur fabrication ne se fait pas facilement. Le bore est dur, fragile, rigide et ne peut pas être étiré. Par conséquent la fabrication des fibres de bore se fait par dépôt en phase vapeur du bore sur un filament de tungstène. Les fibres de bore possèdent des

propriétés élevées en traction mais il faut également noter leurs bonnes propriétés en compression. [41]

### II.2.3. Les matrices

Le rôle de la matrice est principalement de lier les fibres, mais aussi, d'assurer une répartition spatiale est homogène du renfort. D'un point de vue mécanique, la matrice transmet et répartie les efforts extérieurs vers le renfort. D'un autre côté, elle apporte à la structure une tenue chimique et donner la forme désirée au produit [42].

On peut retrouver dans l'organigramme ci-dessous, les différentes familles de matrices

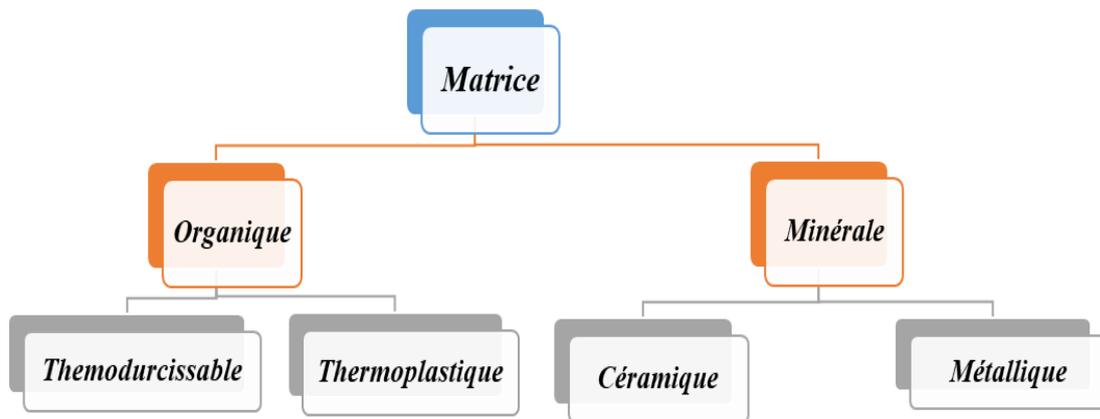


Figure II.8 : Classification des matrices. [43]

#### II.2.3.1 Les matrices organiques

La matrice détermine en général la limite de la température d'utilisation et l'environnement de service du matériau. Il existe un grand nombre de polymères pouvant servir de matrice aux matériaux composites. Ceux parmi les plus utilisés sont les suivants :

- Les résines thermodurcissable (TD)
- Les résines thermoplastiques (TP)

Les principales différences entre les Matrices (TD) et (TP) sont représentées dans le tableau (II.3)

**Tableau II.3 : Principales différences entre les Matrices TP et TD. [42]**

MATRICES	THERMOPLASTIQUES (TP)	THERMODURCISSABLES (TD)
Etat de base Stockage	Solide prêt à l'emploi illimité	Liquide polymérise visqueux à réduit
Moulage Chauffage + refroidissement	Chauffage+ refroidissement	Chauffage continu
	Court	long
	Réduite	bonne
	Assez bonne	limitée
	Recyclables	Perdus ou recyclés en charge
Mouillabilité renforts	Difficile	Aisée

### II.2.3.2. Les matrices thermodurcissables (TD)

Ce sont des polymères, qui après traitement thermique se transforment en des produits essentiellement infusibles et insolubles. Ces résines ont la particularité de n'être mises en forme qu'une seule fois (processus irréversible). Ces résines sont exceptionnellement utilisées avec renforts du fait de leur fragilité.

Ont une stabilité thermique beaucoup plus élevée en comparaison avec les matériaux thermoplastiques, un grand avantage pour des applications d'une demande très élevée. Des remplisseurs ou charges sont employés en polymères pour une variété de raisons, à savoir réduire le coût, améliorer le traitement, la densité de commande, conductivité thermique, dilatation thermique, propriétés électriques, propriétés magnétiques, retard de flamme, et pour améliorer les propriétés mécaniques [44].

### II.2.3.3 Les matrices thermoplastiques (TP)

Ce sont des résines qu'on appelle communément les plastiques, fréquemment utilisées sans renfort et qui possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme plusieurs fois par chauffage et refroidissement dans un intervalle de température spécifique au polymère étudié.

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont dures et solides qui 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. [45]

- **Les adhésifs**

Les adhésifs utilisés en génie civil sont appelés « des colles structurales » c'est à dire qu'ils sont capables de conférer à un assemblage une résistance équivalente à celle des matériaux qui le constituent, tout en assurant le transfert des contraintes entre les deux substrats.

Dans le cas de réparation d'une structure métallique par matériaux composite, un adhésif est nécessaire pour coller le matériau composite sur une surface de l'acier, dont l'objectif est de transmettre les contraintes entre l'acier et le composite [45].

### II.3. Généralité sur les matériaux à gradient de propriété FGM

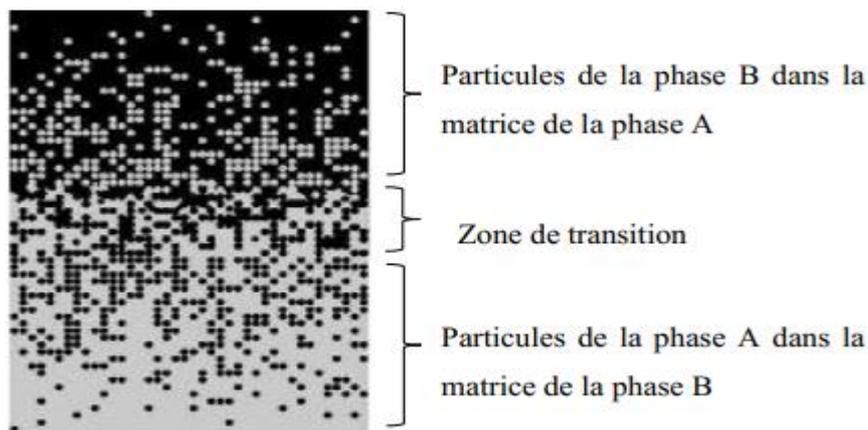
Les matériaux sont continuellement développés au fil du temps comme indiqué sur la figure (II.9), des matériaux purs de l'époque aux matériaux composites qui sont utilisés aujourd'hui. Au tout début, l'utilisation des matériaux purs était plus fréquente mais ils étaient très limités, puisque l'application réelle peut ne pas être satisfaite par l'utilisation d'un seul métal, les alliages peuvent être plus forts et plus polyvalents. Le bronze, qui est l'alliage de cuivre et d'étain, était le premier alliage qui a été développé en 4000 A.J.C (âge de bronze) [46]. Depuis lors, différents mélanges de matériaux ont été réalisés afin de combiner leur forces selon les exigences fonctionnelles.



*Figure II.9 : Développement des matériaux depuis l'âge de bronze [46].*

L'intérêt que porte les secteurs d'ingénierie comme l'aéronautique, l'automobile et autres, à l'utilisation des matériaux composites, réside essentiellement dans la réduction de la masse tout en assurant un bon apport de résistance et de rigidité. Cependant, le matériau composite classique ne peut pas répondre efficacement dans certains environnements où la température est relativement élevée. En effet, les constituants du composite réagissent différemment aux chargements thermiques laissant de ce fait apparaître des contraintes résiduelles internes. Contrairement aux métaux, la céramique a d'excellentes propriétés thermiques, mais son utilisation dans les applications est très limitée à cause de sa fragilité mécanique. La recherche

de matériaux couplant les propriétés mécaniques et thermiques a longterm suscité la réflexion des chercheurs jusqu'au milieu des années quatre-vingt, où dans le cadre de sa recherche sur les composites à haut pouvoir thermique, le chercheur Japonais Koizumi (1993) [47] propose le concept de matériaux à gradient de propriétés. Les matériaux à gradient de propriétés (en Anglais : Functionally Graded Material, FGM) appartiennent à une classe de matériaux composites fabriqués à partir de différents matériaux (souvent de la céramique et du métal) et présentant une microstructure très hétérogène avec un effet considérable de couplage flexion-membrane d'un point de vue comportement mécanique. Dans ce cas de figure, la céramique assure la protection thermique, tandis que le métal de par ses propriétés ductiles, protège la structure contre des ruptures brusques qui occasionnent la ruine des structures. La figure II.10 illustre la microstructure d'un matériaux FGM présentant deux phases A et B dans le cas d'un gradient de composition.



*Figure II.10: Microstructure d'un matériaux à gradient de propriétés FGM [48].*

On peut y observer l'intégration de particules de différentes formes (généralement sphériques) dans une matrice isotrope. La particularité des FGMs est la variation graduelle et continue de la fraction volumique de chacun de ses constituants. Cette propriété permet à ces matériaux d'éliminer les problèmes d'interfaces (la surface de contact entre les différents constituants est quasi nulle). Par cette microstructure, la présence des contraintes résiduelles est considérablement réduite, évitant ainsi les problèmes de délaminage tout en améliorant la durée de vie en service de la structure. Aussi, on peut remarquer que les faces du matériaux FGM sont constituées de matériaux purs. Dans l'exemple du mélange de céramique et du métal, la variation graduelle des constituants débute de la surface en céramique pure pour atteindre la surface en métal pur. Avec ces propriétés matériaux particulières, les FGMs trouvent leurs applications dans divers domaines d'ingénierie ([49]–[50]). Au début de leurs

utilisations, les FGMs servaient de barrières thermiques pour les structures aérospatiales et les réacteurs de fusion [51]–[52]. Ils sont aussi utilisés dans certaines applications comme composants structuraux dans des environnements de haute température [53].

Aujourd’hui leurs domaines d’utilisations se sont beaucoup diversifiés : dans le domaine médical, on peut les retrouver comme implants, en optique, ils sont utilisés sous forme de verres à indice de réfraction graduelle etc.

### II.3.1. Définition des FGM

Un matériau composites intelligents (Un matériau à gradient évalué FGM) est un matériau dans lequel la composition et la structure changent graduellement en entraînant une modification correspondante dans les propriétés du matériau. Ce concept de FGM peut être appliqué à divers matériaux pour des utilisations structurelles et fonctionnelles. Il y a plusieurs années, ce concept a été évalué en premier lieu dans le développement de revêtement des barrières thermiques pour augmenter la résistance thermique des lames dans les moteurs de turbine à gaz pour diverses applications telles que les systèmes de protection thermique.

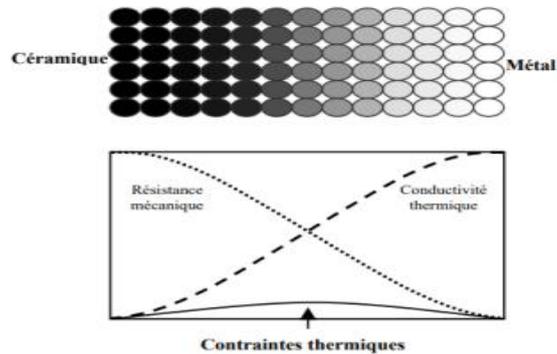
Généralement, les FGMs sont des matériaux constitués de plusieurs couches contenant des composants différents tels que les céramiques et les métaux. Les vides sont également considérés comme une composante des matériaux FGM. Ils sont donc des composites présentant des caractéristiques macroscopiquement inhomogènes. La plupart des « FGM » sont constitués des céramiques et des métaux dont les propriétés mécaniques sont comparées dans le tableau II.4. [54].

**Tableau II.4 :** Comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal. [54].

La face à haute température	Céramique	-Bonne résistance thermique -Bonne résistance à l’oxydation -faible conductivité thermique
Continuité du matériau d’un point à l’autre «Couche intermédiaire »	Céramique- métal	-Elimination des problèmes de l’interface -Relaxer les contraintes thermiques
La face à basse température	Métal	-Bonne résistance mécanique -Conductivité thermique élevée -Très bonne ténacité

Le changement continu dans la composition et donc dans la microstructure d’un matériau « FGM » est illustré dans la figure II.11. Il en résulte un gradient qui déterminera les propriétés

des « FGM ». Dans certains cas, on peut avoir un FGM constitué d'un même matériau mais de microstructure différente. [54].



*Figure II.11 : Concept des matériaux à gradient de propriétés [54].*

### **II.3.2. Méthode de fabrication des FGM**

Les procédés de fabrication des FGMs sont nombreux et diversifiés. Les méthodes les plus connues sont : les dépôts physiques et chimiques en phase de vapeur, la synthèse par auto-combustion, le couplage en bande, l'implantation ionique. Toutes ces méthodes de fabrications se rivalisent sur des aspects techniques comme, par exemple, la simplicité du contrôle de la microstructure au cours de la fabrication et la limitation de la présence de contraintes résiduelles. Ces techniques ont beaucoup évolué au cours des années et ont permis d'élaborer les différents types de gradient existant avec des précisions appréciables [55]. Quelques un d'entre eux sont décrits ci-dessous en détail.

#### **II.3.2.1. Frittage en infiltration**

Cette technique est constituée de deux étapes et convient à la fabrication d'un composite à gradient de fonction composé de deux matériaux dont les températures de fusion sont très différentes. La première étape est de fabriquer une matrice frittée du matériau à haute température de fusion avec un gradient de porosité. La seconde étape est de remplir ces porosités avec le deuxième matériau fondu par infiltration. Le résultat est excellent pour la diminution de la contrainte thermique [56]. Cette technique peut être généralement appliquée pour plusieurs combinaisons de matériaux qui sont chimiquement inertes et qui ont des points de fusion bien différents les uns par rapport aux autres.

### ***II.3.2.2. Implantation ionique***

C'est une technique avancée pour la fabrication des FGM permettant de réaliser seulement des épaisseurs fines (sur différents substrats (plastique, céramique, et métaux). Le traitement d'effectue par les faisceaux énergétiques d'ions eu via de gaz réactifs. Les couches fabriquées présenteront un gradient de composition qui peut être très finement contrôlé

### ***II.3.2.3 Technique de dépôt à la vapeur***

Les techniques de dépôt à la vapeur décrivent une variété de méthodes de dépôt sous vide qui peuvent être utilisées pour produire des films minces sur les matériaux de base. Toutes ces techniques peuvent être utilisées pour produire des FGM minces uniquement.

Différents types de techniques de dépôt en phase vapeur comprennent le dépôt physique en phase vapeur (PVD) et le dépôt chimique en phase vapeur (CVD). Ils consomment beaucoup d'énergie et produisent des jauges toxiques comme sous-produits [57].

D'autres techniques basées sur le dépôt qui peuvent déposer des revêtements minces fonctionnellement dégradés sont le dépôt par faisceau d'électrons (EBD), le dépôt par faisceau ionique (IBD) et la synthèse à haute température auto-propagatrice (SHS) [58]. Toutes les méthodes mentionnées ci-dessus ne sont pas économiques pour produire des MGF de type en vrac.

### ***II.3.2.4 Métallurgie des poudres***

La technique basée sur la métallurgie des poudres peut être utilisée pour produire des MGF de type en vrac avec une structure discontinue (par étapes). Le procédé est réalisé en utilisant des étapes comprenant le pesage et le mélange de poudre selon la distribution spatiale préconçue selon les exigences fonctionnelles, l'empilage et l'éperonnage des poudres prémélangées, et enfin le frittage [59].

### ***II.3.2.5 Méthode centrifuge***

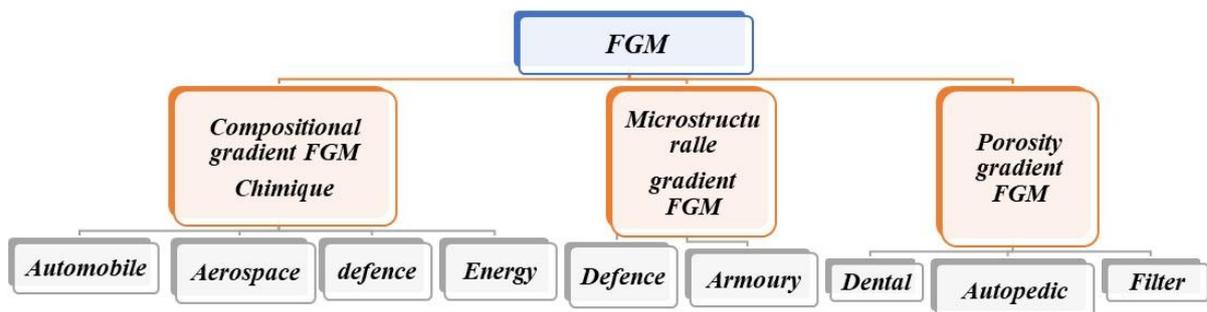
La méthode centrifuge est capable de produire des FGM de type en vrac à structure continue. Il utilise la force de gravité par filage de la moisissure pour produire des matériaux fonctionnels [60]. La différence de densité des matériaux et le filage des moules produisent des FGM. Cette méthode a deux inconvénients : cette méthode ne peut produire que des FGM de forme cylindrique et il existe une limite à laquelle le type de gradient peut être produit.

### II.3.2.6 Techniques de fabrication par impression 3D

En anglais : Solid freeform fabrication (SFF)/Additive manufacturing (AM), également appelée impression 3D, est un processus de jonction de matériaux pour fabriquer des objets à partir de données de modèles 3D, généralement couche par couche, par opposition à la technologie de fabrication soustractive [61]. Cet outil sans procédé de fabrication peut produire des pièces métalliques denses en peu de temps, avec une grande précision

### II.3.3. Différents types de FGM

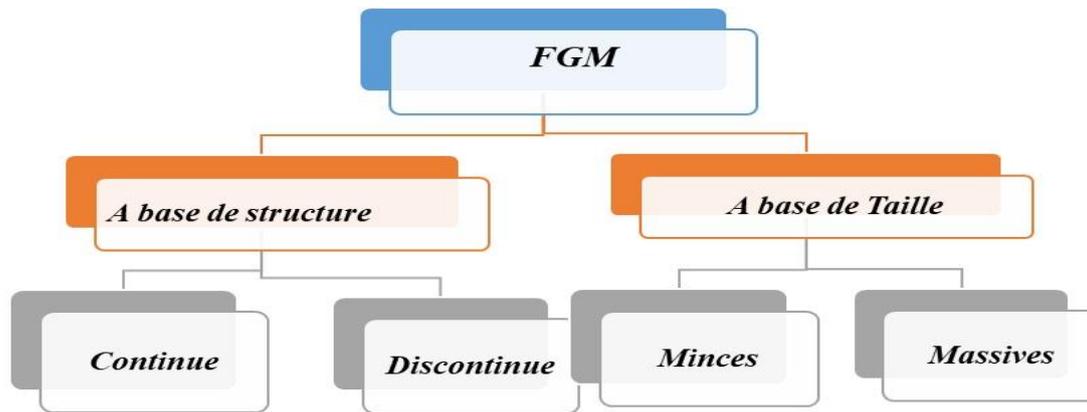
Au début du développement des matériaux à gradient fonctionnel, le concept était de supprimer l'interface qui existait dans le matériau composite traditionnel, et de le remplacer par une interface graduellement progressive. L'intérêt croissant pour ce type de matériau a entraîné le développement de différents types de FGM, ce qui se traduisait par une modification de la composition chimique de ce composite. A cet effet deux critères différents sont utilisés pour classer les matériaux fonctionnels à gradient de propriétés. Comme le montre la figure II.12 suivante :



*Figure II.12 : Classification des matériaux à gradient de propriétés fonctionnelle [62].*

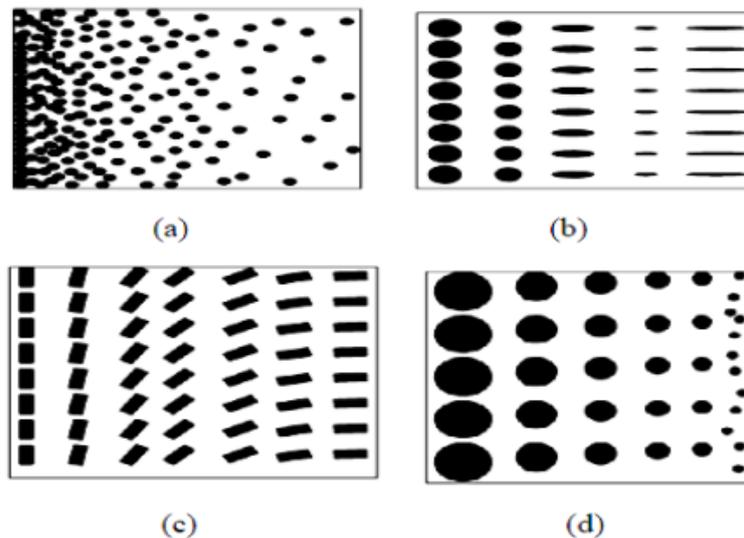
L'intérêt croissant pour ce type de matériau a entraîné la mise au point de différents types de FGM dans la figure II-13, le type d'application envisagée détermine généralement le type de FGM à utiliser.

Les matériaux ayant une composition, une microstructure ou une porosité changeantes à travers le volume du matériau sont appelés matériaux à gradient de propriétés fonctionnelle (FGM) [62].



**Figure II.13:** Les trois types de matériaux à gradient de propriétés et leurs applications [62].

Selon la nature du gradient, les FGM peuvent être regroupées en types suivants (voir *Figure. II.14*)



**Figure II.14 :** Différents types des matériaux à gradients de propriétés : a) type gradient de fraction, b) type à gradient de forme, c) type à gradient d'orientation et d) à gradient de taille [63].

### II.3.3.1 Matériaux à gradient de composition chimique

Il s'agit du type de FGM qu'on va traiter en détail dans ce mémoire, où la composition chimique varie progressivement, en fonction du rayon dans le matériau. Cela pourrait être sous la forme d'une seule phase, ou dans un matériau multiphasé. Un FGM monophasé est produit lorsque le composite est produit à partir d'une seule phase, en raison de la solubilité des éléments chimiques d'une phase dans l'autre phase. Cela se produit généralement pendant le processus de frittage [63]

Le changement progressif de la distribution des éléments chimiques dans la phase unique entraîne la formation du matériau à gradient fonctionnel.

Selon le diagramme de phase et les limitations thermodynamiques, lorsque certains matériaux sont ajoutés à un autre matériau, le matériau qui a été ajouté serait soluble dans une gamme de conditions de composition et de mélange. Un tel matériau deviendrait ce qu'on appelle un matériau monophasé, mais avec une composition chimique variable en raison de la solubilité.

Ce type de FGM est moins commun. Les matériaux classés de façon fonctionnelle les plus couramment utilisés sont ceux qui ont une composition chimique multiphasique [64, 65].

Les phases et la composition chimique sont faites pour varier à travers le volume du matériau. Comme la composition du matériau varie d'un matériau à l'autre, il en résultera différentes phases avec différentes compositions chimiques qui aideraient à réaliser l'application prévue, pour laquelle le FGM a été conçue. Les différentes phases qui sont produites dépendent de la quantité de composition du matériau de renforcement et des conditions d'élaborations, telles que la vitesse de refroidissement et le traitement thermique effectué sur ce matériau. En métallurgie des poudres, le procédé de production de FGM consiste à mettre couche par couche la composition de poudre requise, puis le compactage de la poudre et ensuite le frittage.

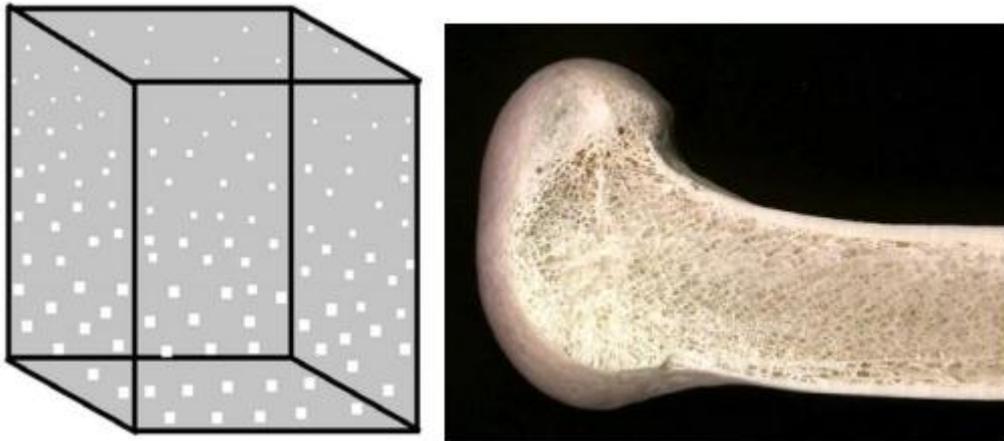
On appelle frittage le processus de liaison qui s'établit entre particules voisines lorsqu'une poudre ou un mélange de poudres compact est chauffé à haute température. Différentes techniques de frittage existent.. Au cours du processus de frittage, certaines poudres métalliques réagiront pour former différents composés et phases chimiques. Ceux-ci varieraient en fonction de la position dans le volume du matériau à gradient fonctionnel. [66]

### ***II.3.3.2 Matériaux à gradient de porosité***

Le matériau à gradient fonctionnel de gradient de porosité est un autre type de FGM, dans lequel la porosité dans le matériau est amenée à changer par rapport à une direction dans le matériau. La forme et la taille des pores sont conçues et variées, selon les propriétés requises du matériau à gradation fonctionnel.

Ce type de matériau fonctionnel est très important pour les applications biomédicales, car le matériau naturel qu'ils ont l'intention de remplacer consiste en une porosité graduelle fonctionnelle, et la porosité graduelle aiderait également à l'intégration de l'implant et des tissus environnants. La porosité est importante pour le processus de cicatrisation de cet

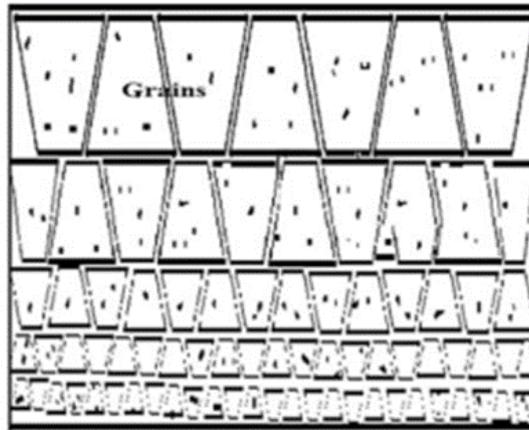
implant, et contribue également à la circulation sanguine vers les tissus intégrés. La porosité graduée aide également à réduire le poids total de l'implant et à améliorer le module d'élasticité du matériau de l'implant pour qu'il corresponde à celui du tissu humain. La porosité graduée aide à réduire la densité du bio-implant. Ceci est nécessaire pour éviter la protection contre les contraintes qui se produit lorsque le module d'élasticité de l'implant est supérieur à celui de l'os humain figure II.15. [66]



*Figure II.15 : à gauche le schéma d'un FGM à porosité graduée, à droite une image montrant la porosité graduelle d'un os.[66]*

### **II.3.3.3 Matériaux à gradient microstructural**

Le matériau à gradient fonctionnel microstructural est un autre type de FGM, où la microstructure est adaptée de sorte que les différentes microstructures sont produites dans le matériau, qui est amené à changer graduellement, de manière à obtenir les propriétés requises du matériau. La gradation microstructurale peut être obtenue au cours du processus de solidification, de sorte que la surface du matériau est trempée, par exemple, lors de la production d'une propriété de surface très dure du matériau. On laisse refroidir lentement le noyau du même matériau, ce qui aiderait à produire différentes microstructures de celles situées. Un diagramme schématique d'une microstructure typiquement graduée est présenté à la Figure II.16.



*Figure II.16 : Schéma d'une microstructure graduée. [66]*

La microstructure graduée entraînerait un changement progressif des propriétés du matériau par rapport à la position, puisque la microstructure dépend de la position dans le FGM et que la microstructure est directement liée aux propriétés du matériau.

Les FGM à gradient microstructural trouvent leur application dans des composants qui doivent avoir une surface très dure pour résister à l'usure, et un noyau dur pour résister à l'impact élevé qui se produit pendant l'opération. Un exemple de ce type de matériau fonctionnellement gradué comprend l'acier cémenté, les cames ou les couronnes, les paliers ou arbres et les applications de turbine [66, 67].

### ***II.3.4. Les différentes lois de mélange***

#### ***II.3.4.1 Loi de mélange de composites***

Dans le cas d'un matériau où les fibres sont continuées (enroulements, plaques), il est raisonnable d'imaginer que l'approximation "en parallèle" dans laquelle les déformations sont uniformes d'une phase à l'autre est bien respectée.

Si les effets latéraux sont négligés, on peut évaluer le module de Young équivalent dans la direction des fibres par une approximation de déformation uniforme. Si au contraire la sollicitation s'applique en sens travers, les phases seront "en série", dans une configuration bien adaptée pour appliquer l'approximation de contrainte uniforme [68]. En désignant par des indices  $m$  et  $f$  respectivement pour la matrice et la fibre,  $E_L$  et  $E_T$  Module de Young de composite en sens long, et transverse on écrit que :

$$E_L \text{ en sens long : } \quad E_L = (E_f \cdot V_f) + (E_m \cdot V_m) \quad (\text{II.1})$$

$$E_T \text{ en sens transverse : } \frac{1}{E_T} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \quad (\text{II.2})$$

- $V_m$  : Fraction volumique de matrice
- $V_f$  : Fraction volumique de fibre
- $E_m$  : Module de Young des matrices
- $E_f$  : Module de Young des fibres

La somme des fractions de volume de tous les matériaux constitutifs doit être égal à 1 :

$$V_f + V_m = 1 \quad (\text{II.3})$$

Lors d'une traction en sens long, les déformations latérales de chaque phase se combinent :

$$\varepsilon_T = V_m \cdot \varepsilon_{Tm} + V_f \cdot \varepsilon_{Tf} \quad (\text{II.4})$$

Chacune des déformations latérales  $\varepsilon_{Tm}$  et  $\varepsilon_{Tf}$  s'expriment en fonction de la déformation longitudinale  $\varepsilon_L$ , qui est supposée être la même pour les deux phases,  $\varepsilon_{Tm} = \nu_{LTm} \cdot \varepsilon_L$  et  $\varepsilon_{Tf} = \nu_{LTf} \cdot \varepsilon_L$ . Le coefficient de Poisson équivalent est donc obtenu par une moyenne directe.

$$\nu_{LT} = V_m \cdot \nu_m + V_f \cdot \nu_f \quad (\text{II.5})$$

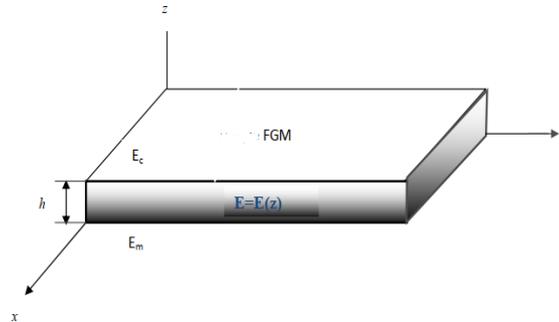
Pour le terme de cisaillement transverse, l'hypothèse simple la plus réaliste consiste à considérer que la contrainte de cisaillement sera conservée. La moyenne s'applique donc sur les inverses des modules :

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{V_m}{G_m} + \frac{V_f}{G_f} \quad (\text{II.6})$$

#### II.3.4.2. Les Lois de mélange des FGM

Les matériaux à gradient évalué « FGM » consistent en l'association de deux matériaux aux propriétés structurelles et fonctionnelles différentes avec une transition idéalement continue de la composition, de la structure et de la distribution des porosités entre ces matériaux de manière à optimiser les performances de la structure qu'ils constituent. Les caractéristiques les plus distinctes des matériaux FGM sont leurs microstructures non-uniformes avec des macro-propriétés graduées dans l'espace. Un FGM peut être défini par la variation des fractions de volume. La plupart des chercheurs emploient la fonction de

puissance, la fonction exponentielle, ou la fonction sigmoïde pour décrire les fractions de volume. Les liaisons entre les particules doivent être assez dures à l'intérieur pour résister à la rupture, et également assez dures à l'extérieur pour empêcher l'usure.



*Figure II.17 : Géométrie d'une plaque en FGM [69].*

Les coordonnées  $x$  et  $y$  définissent le plan de la plaque, tandis que l'axe  $z$  perpendiculaire à la surface moyenne de la plaque et dans la direction de l'épaisseur.

Les propriétés du matériau dont le module de Young et le coefficient de Poisson sur les surfaces supérieures et inférieures sont différentes mais sont déterminés selon les demandes d'exécution. Toutefois le module de Young et le coefficient de Poisson varient de façon continue, dans le sens de l'épaisseur (l'axe  $z$ ) soit :  $E = E(z)$ ,  $\nu = \nu(z)$ . Le module de Young dans le sens de l'épaisseur de la plaque FGM varie en fonction de la loi de puissance (P-FGM) ou la fonction exponentielle (E-FGM) ou avec la fonction sigmoïde (S-FGM).

#### **II.3.4.2.1. Propriétés matérielles de la plaque P-FGM**

La fraction volumique de la classe P-FGM obéit à une fonction en loi de puissance.

$$V(z) = \left( \frac{z + h/2}{h} \right)^k \quad (\text{II.7})$$

Où  $k$  est un paramètre matériel et  $h$  est l'épaisseur de la plaque. Une fois la fraction volumique locale  $v(z)$  à été définie, les propriétés matérielles d'une plaque P-FGM peuvent être déterminées par la loi des mélanges[70]

$$E(z) = (E_c - E_m)V(z) + E_m \quad (\text{II.8})$$

$E_1$  et  $E_2$  : Sont respectivement les modules de Young de la surface inférieure ( $z=-h/2$ ) et de la surface supérieure ( $z=+h/2$ ) de la plaque FGM.

La fraction volumique de la plaque **P-FGM** est représentée dans la figure II.18

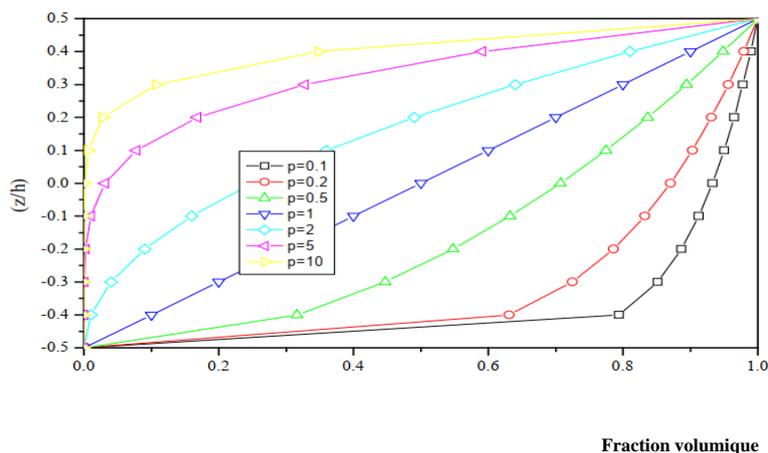


Figure II.18 : Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM [69].

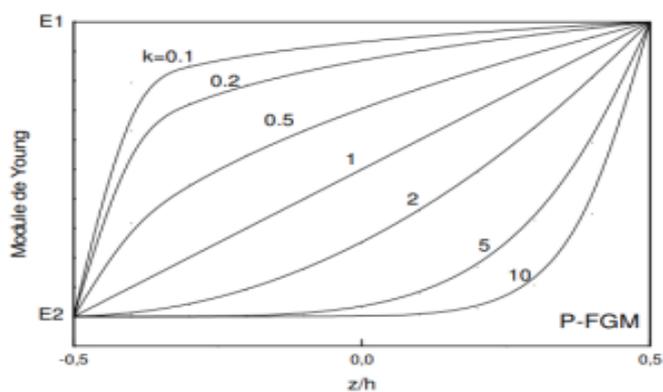


Figure II.19 : La variation du module de Young dans une structure P-FGM [71].

**II.3.4.2.2. Propriétés matérielles de la plaque S-FGM**

Dans le cas d'ajouter une plaque P-FGM d'une simple fonction de loi de puissance à une plaque composite multicouche, les concentrations des contraintes apparaissent sur l'interfaces où le matériau est continu mais change rapidement [70] Par conséquent, Chung et chi [72] ont défini la fraction de volume de la plaque FGM en utilisant deux fonctions de loi de puissance pour assurer une bonne distribution des contraintes parmi toutes les interfaces. Les deux fonctions de loi de puissance sont définies par :

$$V_1(z) = \frac{1}{2} \left( \frac{h/2 + z}{h/2} \right)^k \text{ pour } -h/2 \leq z \leq 0$$

$$V_2(z) = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{h/2 - z}{h/2} \right)^k \text{ pour } 0 \leq z \leq +h/2$$

**(II.9)**

En utilisant la loi des mélanges, le module de Young de la plaque S-FGM peut être calculé par :

$$E(z) = V_1(z)E_1 + [1 - V_1(z)]E_2 \quad \text{pour } -h/2 \leq z \leq 0 \tag{II.10}$$

$$E(z) = V_2(z)E_1 + [1 - V_2(z)]E_2 \quad \text{pour } 0 \leq z \leq +h/2$$

La figure II.20 montre que la variation de la fraction volumique dans les équations (II.9) représente les distributions sigmoïdes, (sinusoïdales) et cette plaque FGM est appelée (*Plaque S-FGM*)

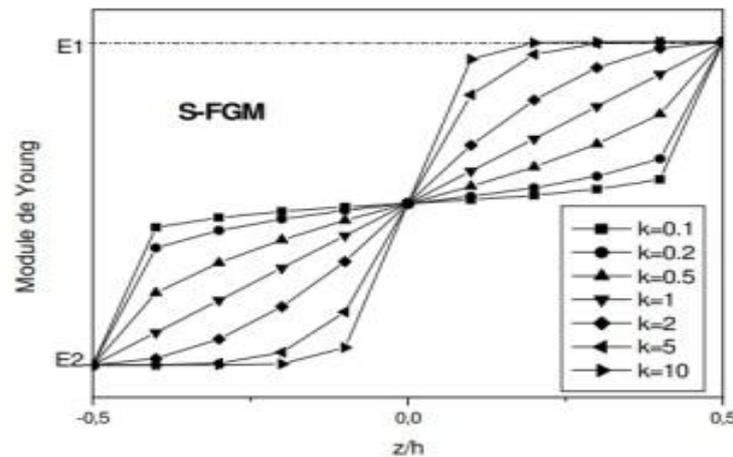


Figure II.20: Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM [34]

La variation du module de Young selon les équations avec des distributions sigmoïdes est présentée dans la figure II.21, et par conséquent la structure FGM appelée (SFGM).

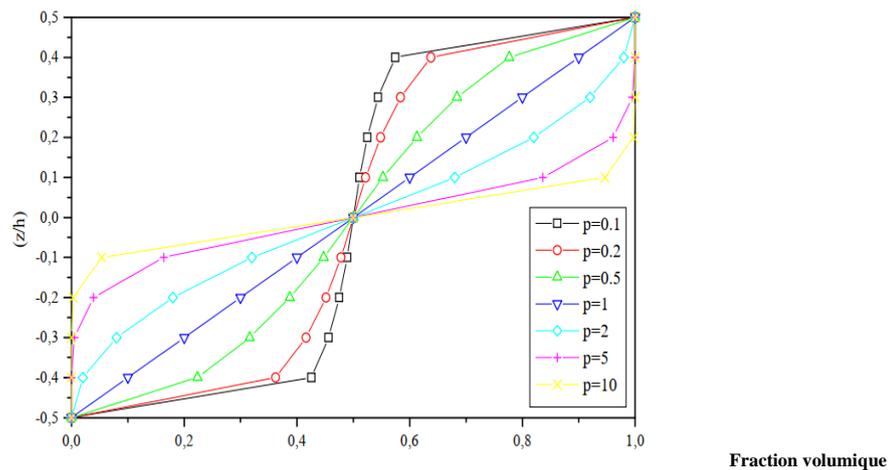


Figure II.21 : La variation du module de Young dans une structure S-FGM [71].

### II.3.4.2.3. Propriétés matérielles de la plaque *E-FGM*

Pour décrire les propriétés matérielles des matériaux FGM, la plupart des chercheurs utilisent la fonction exponentielle qui s'écrit sous la forme [73] :

$$E(z) = E_2 e^{B(z+h/2)} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$$B = \frac{1}{h} \ln \left( \frac{E_1}{E_2} \right) \quad (\text{II.12})$$

La variation du module de Young à travers l'épaisseur de la plaque *E-FGM* est représentée dans la figure II.22

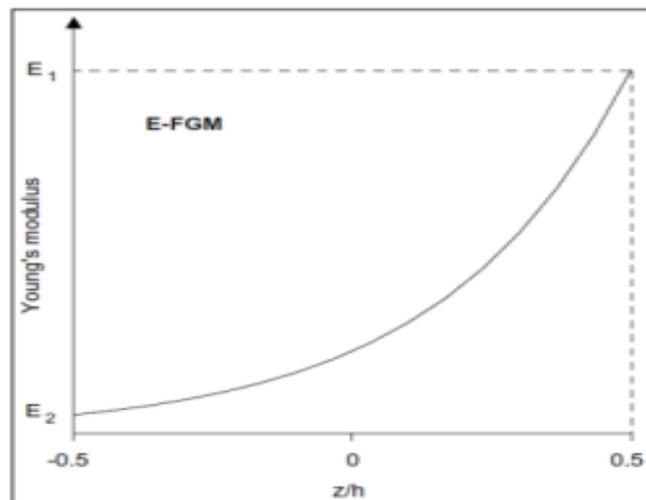


Figure II.22 : Variation du module de Young dans une plaque *E-FGM* [74].

## II.4. Conclusion

Le matériau fonctionnellement gradué, ce nouveau matériau est un domaine important de la recherche, et il a attiré l'attention des chercheurs avec le domaine d'application

L'ensemble des propriétés mécaniques uniques des matériaux FGM, offrent un certain nombre d'avantages aux matériaux exposés à un environnement extrême de travail par rapport aux matériaux composites.

On peut facilement comparer les FGM aux composites car ils partent du même principe, si on prend les FGM on peut dire que ce sont des matériaux contenant des composants différents.

La différence c'est que les FGM tels que les céramiques et les métaux sont non homogènes, et leur changement continue dans la composition et donc dans la microstructure. Dans certains cas on peut avoir un FGM constitué d'un même matériau mais de microstructure différente.

## *Chapitre III*

# *Mode de rupture des poutres renforcées*

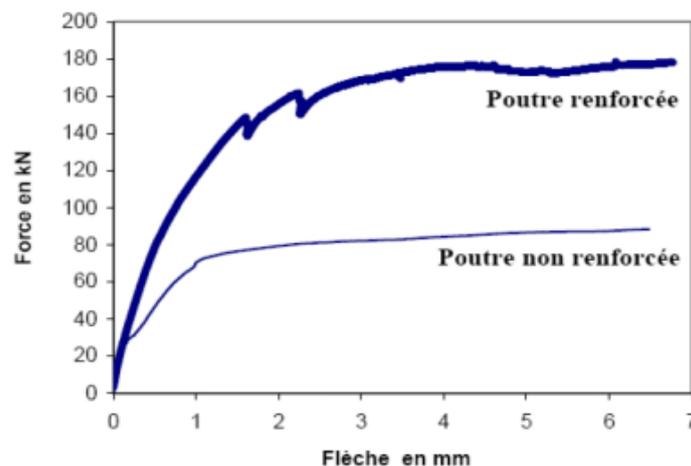
### III.1. Introduction

L'utilisation d'un tissu de matériaux composites associé à des colles époxy sur des surfaces tendues ou sur des surfaces latérales est un moyen très efficace pour renforcer les poutres en béton armé, plus particulièrement, pour les poutres faiblement armées. Le collage du tissu sur des surfaces tendues augmente la résistance ultime des poutres renforcées et en diminuant la flèche des structures, il augmente également leur raideur limitant ainsi la propagation des fissures.

Ce phénomène permet de diminuer la corrosion des armatures et d'améliorer la durabilité des structures. Une des applications les plus courantes des matériaux composites pour le renforcement des structures en béton armé concerne les structures soumises aux sollicitations de flexion ou celles d'effort tranchant.

### III.2. Comportement des poutres renforcées par matériaux composites :

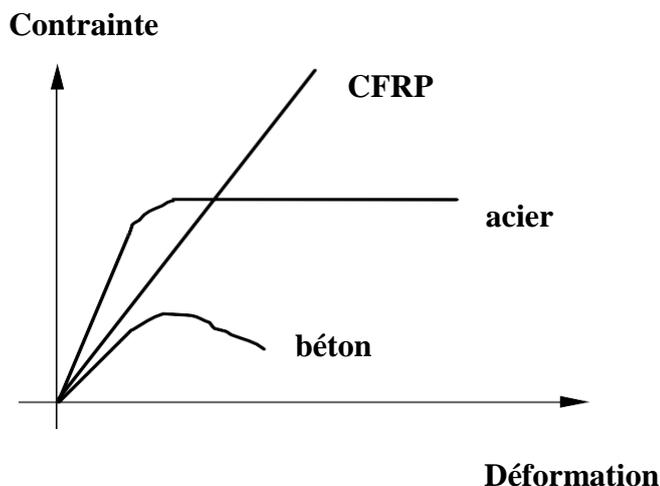
Une poutre est un corps matériel qui possède une direction privilégiée. En effet, une poutre a la particularité d'avoir une dimension dont l'ordre de grandeur est supérieur aux deux autres. Typiquement, les dimensions caractéristiques de la section sont petites par rapport à la longueur de la poutre. [75]



*Figure III.1 : Comparaison de comportement entre les poutres renforcées et celles non renforcées [75].*

Le matériau composite est un matériau élastique dont le comportement diffère de celui du béton et de celui des aciers (Figure III.2). L'adhésion des tissus de FRP sur des surfaces de structures en béton armé provoque donc une modification des comportements structuraux

comparativement à ceux des structures en béton armé non renforcées : par exemple, la relation entre la force et la flèche ou le mode de rupture.



*Figure III.2 : Comparaison de comportement entre différents matériaux [76]*

### **III.2.1. Le cas d'une poutre en béton armé renforcée par matériau composite**

Le FRP, étant un matériau de haute résistance à la traction, peut généralement être utilisé pour ses plus grands avantages, lorsqu'il est combiné avec du béton qui est résistant à la compression mais pauvre en tension. De telles applications comprennent le collage externe de FRP pour poutres en béton pour des fins de renforcement (Figure III.3), ou structures en béton armé précontraint avec FRP.

Le collage du tissu sur des surfaces tendues augmente la résistance ultime des poutres renforcées et en diminuant la flèche des structures, il augmente également leur raideur limitant ainsi la propagation des fissures. [76]



*Figure.III.3 : Renforcement par Tissu en Fibres de Carbone TFC d'une poutre en béton armé. [76]*

La maintenance des ouvrages de génie civil est un problème de plus en plus préoccupant dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est de plus en plus élevé.

L'une des techniques les plus classiques et efficaces pour les désordres structurels est la réparation de structures en béton armé dégradé par placage extérieur en acier : faible encombrement et intervention mineure sont les principaux avantages. [76]

### ***III.2.2. Le cas d'une poutre métallique renforcée par matériau composite***

Semblable à une poutre en béton armé, une poutre d'acier peut être renforcée par collage de feuille en FRP (Figure III.4). Nombreux auteurs s'accordent sur la technique de renforcement des structures en acier à l'aide de matériaux composites renforcés par des fibres vis-à-vis de la fatigue.

L'utilisation des FRP dans le renforcement des structures en acier pour les exploitations innovantes profite des avantages des FRP :

- ✓ Le principal avantage du FRP sur de l'acier dans le renforcement des structures est son rapport résistance-poids.
- ✓ Un autre avantage important du FRP, qui ne concerne que les stratifiés de FRP est la capacité de ces stratifiés FRP à suivre des surfaces courbes et irrégulières d'une structure. Ceci est difficile à réaliser en utilisant des plaques d'acier.
- ✓ Un troisième avantage du FRP est que ses propriétés matérielles dans des directions différentes peuvent être adaptées pour une application particulière.

Les plaques d'acier peuvent aussi être adhésif-collé, mais la liaison est moins attrayant pour les plaques d'acier en raison de leur poids et le manque de souplesse dans la forme. [76]



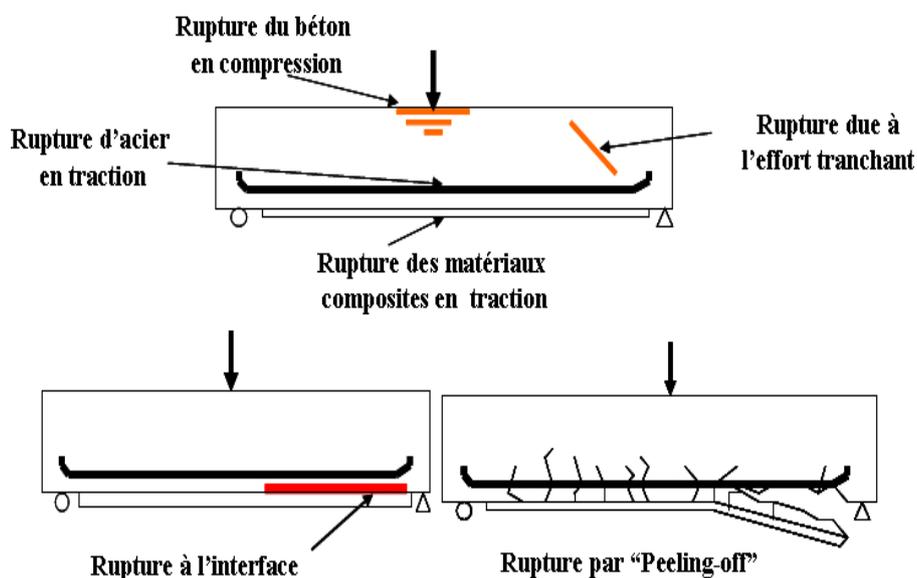
***Figure III.4 : Renforcement par Tissus en Fibres de Carbone TFC d'une poutre en acier [76]***

### III.3. Les différents modes de rupture des poutres renforcées par matériaux composites

Il est maintenant de l'avis général que le renforcement permet d'augmenter la charge de service et dans des proportions plus importantes la charge ultime de l'ouvrage lorsque l'on est en présence de modes de ruine de type conventionnel (rupture du béton en compression ou par effort tranchant, rupture des aciers, rupture du matériau de renforcement). On observe en effet souvent un autre mode de ruine fragile et non-conventionnel que l'on appelle « peeling-off ». Ce mode de ruine résulte du décollement du béton d'enrobage qui reste collé au matériau de renforcement. Les calculs montrent que ce mécanisme de ruine se produit pour un niveau de charge bien plus bas que tous les niveaux de charge entraînant une ruine de type conventionnel.

Le renforcement n'est donc pas dans ce cas de figure optimale. Par conséquent, pour une conception optimale d'un renforcement en flexion par collage, il est important d'être en mesure de prévoir ce type de rupture et d'en tenir compte dans le dimensionnement.

Différents modes de ruptures d'une poutre BA renforcée sont montrés sur la figure III-5. [82].



*Figure III.5 : Différents modes de ruptures de poutres BA renforcées [82].*

Dans la littérature concernant les poutres BA renforcées, de nombreux chercheurs ont établi des règles grâce à des expériences pour prévenir les ruptures prématurées. Pour le renforcement des poutres BA avec des plaques en acier, il est recommandé que le rapport

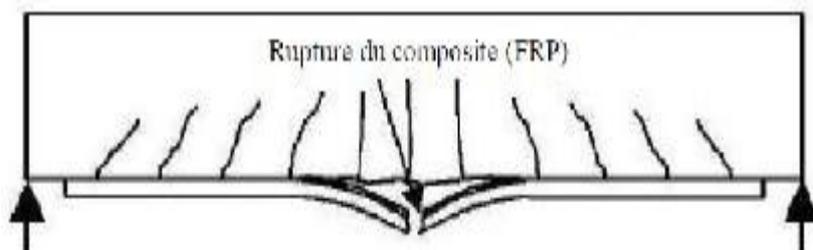
largeur sur épaisseur des renforts ne doit pas être inférieure à 50 ou 60 [77]. Il y a aussi des modèles pour prédire la rupture de poutre ou dalle BA utilisant le renforcement par collage [78] [79] [80]. Nous pouvons aussi citer la méthode basée sur la formation de dents entre les fissures dans le béton d'enrobage, la méthode basée sur la résistance du béton en cisaillement et la méthode basée sur la contrainte interfaciale à l'extrémité de la plaque de renforcement [81] [82].

### **III.3.1. Rupture due à la flexion**

Si les deux extrémités de la plaque du composite sont correctement ancrées, la capacité flexionnelle ultime de la poutre est atteinte lorsque soit la plaque de FRP se rompt par rupture due à la traction (Figure III.6), soit le béton en compression s'écrase (Figure III.7). Cela est très similaire à la rupture flexionnelle classique des poutres en BA, à l'exception de petites différences dues à la fragilité de la plaque collée de FRP. La rupture de cette dernière se produit généralement après plastification des barres d'acier longitudinales.

La figure III.8 illustre le diagramme charge-flèche à mi-portée d'une poutre en BA simplement appuyée, renforcée par des FRP et soumise à la flexion de quatre points. Pour cette poutre particulière, la plaque est terminée très près de l'appui et aucun décollement prématuré ne s'est produit. Au lieu de cela, la poutre s'est rompue en flexion par la rupture du FRP. Comparée avec la réponse correspondante à la poutre de contrôle en BA non renforcée, la poutre plaquée réalise un gain de résistance de 76 % mais montre une ductilité plus réduite.

Le gain de force et la réduction de ductilité sont les deux conséquences principales du renforcement flexionnel des poutres en BA à l'aide de FRP. Les poutres qui se rompent par écrasement du béton, lorsqu'une grande quantité de composites est employée également possèdent une ductilité encore plus réduite [83].



*Figure III.6 : Schéma typique de poutre en BA réparée par le collage de composite endommagée par flexion et par la rupture de tissu. [83].*

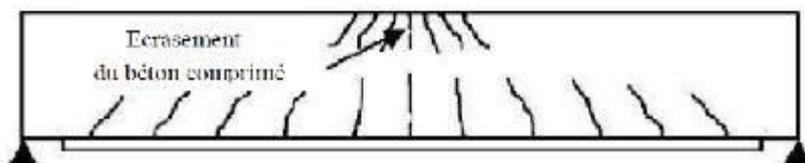


Figure III.7 : Schéma typique de poutre en BA renforcée par le collage de composite endommagée par flexion et par l'écroulement du béton comprimé. [83].

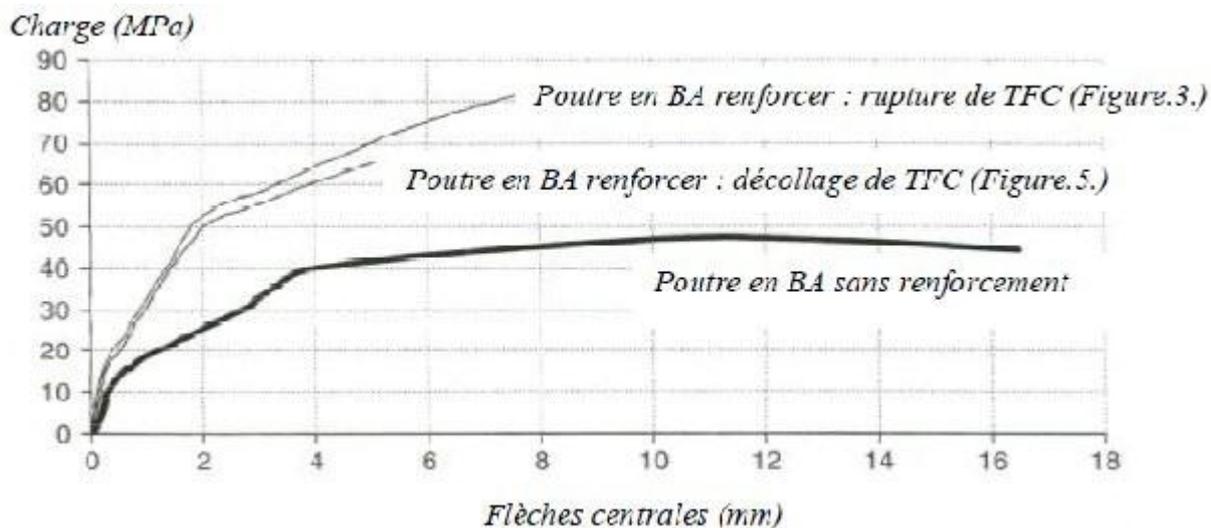


Figure III.8 : Courbes de charge-flèche pour poutres en BA renforcées et non renforcées [83].

### III.3.2. Rupture due au cisaillement

La rupture de poutres due à l'effort tranchant se produit lorsque la résistance au cisaillement des poutres sans renforcement est insuffisante. Les fissures apparaissent d'abord au niveau des extrémités du tissu longitudinal et sont inclinées vers le centre de la poutre de la (Figure III.9). Ce phénomène est une conséquence de la concentration des contraintes provenant du non continuité du tissu.

Ce mécanisme peut être rapproché de celui de la rupture due à la contrainte principale oblique du béton armé sans renforcement additionnel [83].

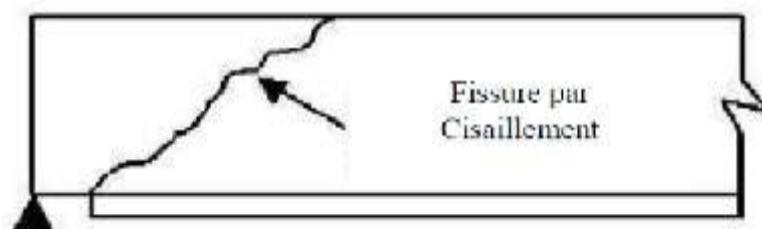


Figure III.9 : Schéma typique du côté de la poutre en BA réparée par le collage de composite endommagée par cisaillement. [83].

### III.3.3. Ruptures par décollement de l'extrémité

La rupture de poutres renforcées due au décollement est la principale cause de la d'élément renforcé par le collage de plaque en composite. Le décollement peut se produire dans 6 parties différentes de la poutre (Figure III.5) :

(1) entre l'armature tendue et l'enrobage en béton, (2) dans l'enrobage en béton, (3) entre le béton et l'adhésif du composite, (4) entre l'adhésif et le tissu ou la plaque en composite, (5) dans l'adhésif et (6) dans le composite.

Les mécanismes de rupture, dus au décollement, les plus observés sont la séparation d'enrobage en béton entre l'armature tendue et le béton et le décollement du composite soit à l'extrémité soit à mi- portée de la poutre. [82]

### III.3.4. Séparation d'enrobage en béton

La rupture de la poutre due à la séparation d'enrobage en béton commence avec la formation d'une fissure près de ou dans la zone de l'extrémité du tissu FRP (Figure III.10). Cette fissure est due aux contraintes normales et de cisaillement élevées engendrées par la fin brusque du tissu FRP [83] ; [85] ; [86] ; [87]. Une fois que cette fissure est formée, elle se propage jusqu'à l'armature tendue et la fissure progresse horizontalement au même niveau que l'armature, en produisant la séparation avec le béton.

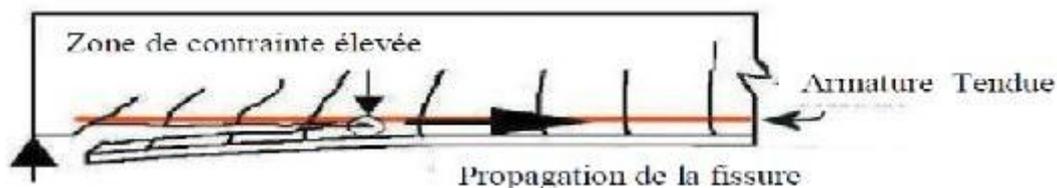


Figure III.10 : Schéma typique du côté d'une poutre en BA réparée par collage du composite endommagée par séparation d'enrobage en béton. [83]

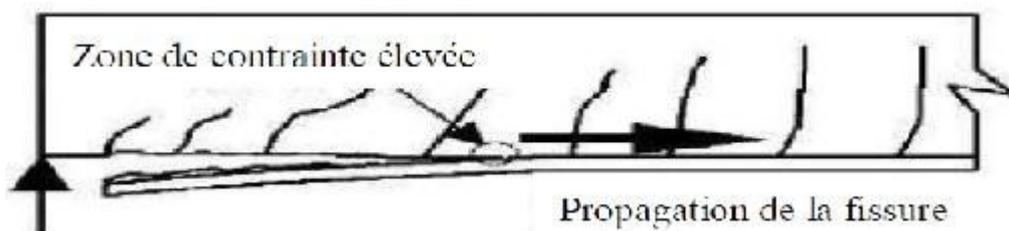
### III.3.5. Décollement du composite à l'extrémité

La rupture due au décollement du tissu composite provient, aussi, de la concentration des contraintes normales et de cisaillement à l'interface colle/béton. La résistance à la contrainte de cisaillement de la colle est alors plus élevée que celle du béton.

Le décollement du tissu se produit la plupart du temps entre le béton et la colle (Figure III.11). C'est la raison pour laquelle de petits morceaux de béton sont retrouvés sur le tissu décollé. Ce mécanisme débute aux extrémités du tissu et se propage vers le centre de la poutre. Il provient de la concentration de contraintes présente à l'extrémité du tissu [88].

Le décollement se produit souvent lorsque trois conditions sont remplies [89] :

- ✓ Une faible portée, ce qui produit un cisaillement élevé et un décollement entre le composite et la poutre, situé proche des appuis,
- ✓ Les extrémités du tissu sont éloignées des appuis,
- ✓ L'application d'un tissu raide limite la flèche et produit une contrainte de cisaillement importante près des extrémités du tissu.



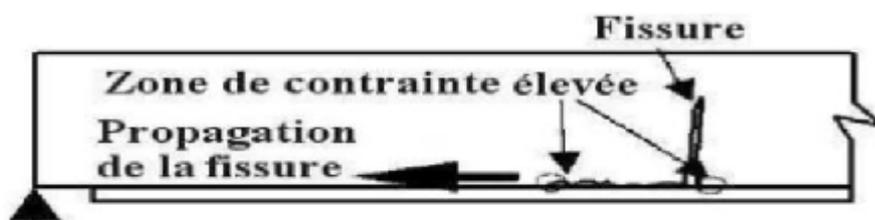
*Figure III.11 : Schéma typique du côté d'une poutre en BA réparée par collage du composite endommagée par décollement du composite (FRP) à l'extrémité. [89]*

### III.3.6. Décollement du composite à mi-portée

Le décollement du tissu à mi-portée se produit à cause de la concentration élevée des contraintes dans l'interface colle/béton. Pour ce mécanisme, la rupture provient de l'importante déformation du tissu provoquée par la propagation de fissures dues à la combinaison des efforts tranchants et du moment fléchissant (Figure III.12). Le décollement à mi-portée se produit sous les conditions suivantes [89] :

Une portée importante de l'effort tranchant, c'est-à-dire, que la résistance à l'effort tranchant aux extrémités est très supérieure à la résistance du moment fléchissant, donc des fissures dues au moment de flexion élevé se produisent proche de la mi-portée,

- Les extrémités du tissu sont très proches des appuis,
- L'application de tissu mince.



*Figure III.12 : Schéma typique du côté d'une poutre en BA réparée par collage du composite endommagée par décollement du tissu à mi-portée. [89]*

### **III.4. Conclusion**

L'utilisation de matériau composite permet de renforcer les structures de façon significative que ce soit en flexion ou en cisaillement. Des modèles analytiques basés sur la théorie des poutres et le calcul de béton armé prédisent de façon relativement satisfaisante les charges ultimes et le comportement de structures ainsi renforcées.

L'efficacité de renforcement poutres par matériaux composites a été validée par différentes recherches, ils ont présenté clairement les améliorations de la capacité mécanique de poutre.

## *Chapitre IV*

*Etude analytique des contraintes  
d'interface d'une poutre console en  
FGM renforcée par différents  
matériaux composites*

## IV.1. Introduction

Le but de ce chapitre est l'étude du comportement mécanique d'une poutre console en FGM renforcée par différents types de composites, une méthode améliorée pour le calcul des contraintes d'interface a été développée.

La détermination des contraintes d'interface a fait l'objet de plusieurs recherches cette dernière décennie Smith et Teng [92], Rabahi et al [93], Hassaine Daouadji et al [94], Hassaine Daouadji et al [95], il a été démontré que les contraintes de cisaillement et les contraintes normales de l'interface sont influencées par le matériau et par les caractéristiques géométriques de la poutre.

Une étude paramétrique sera présentée afin d'examiner l'effet des différents paramètres régissant la distribution des contraintes d'interface comme l'épaisseur de la couche d'adhésif, la largeur et l'épaisseur de la plaque de renforcement, la longueur du bord de la plaque au support (l'appui).

## IV.2. Formulation mathématique

La poutre FGM renforcée est illustrée 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 FGM, la couche d'adhésif et la plaque en composite.

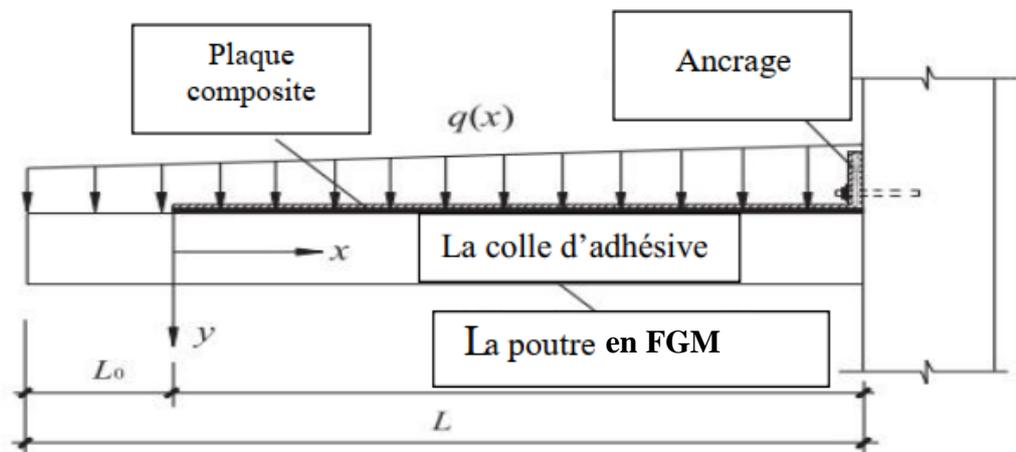
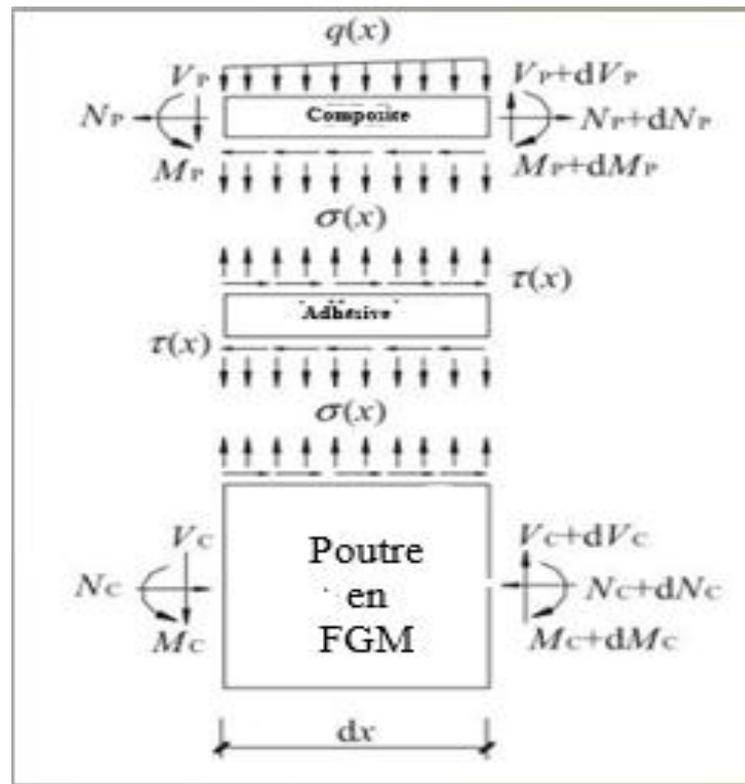


Figure IV.1 : Poutre console renforcée par des plaques en matériaux composites.



**Figure IV.2** : un segment différentiel de la poutre en FGM renforcée par composite.

La couche d'adhésive est supposée jouer un rôle de transfert des contraintes du FGM à la plaque composite avec des contraintes constantes à travers toute son épaisseur

#### ✓ Les déformations

Les déformations  $\varepsilon_1(x)$  de la poutre FGM au voisinage de la couche d'adhésive peut être exprimé par :

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \quad (\text{IV.1})$$

la déformation  $\varepsilon_2(x)$  de la plaque composite au voisinage de la couche d'adhésive est donnée par :

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = \frac{y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{N_2}{E_2 A_2} + \frac{t_2}{3G_2} \frac{d\tau_a}{dx} \quad (\text{IV.2})$$

Où  $u_1(x)$  et  $u_2(x)$  sont les déplacements horizontaux de la poutre en FGM et la plaque composite respectivement.  $M_1(x)$  et  $M_2(x)$  sont respectivement les moments de flexion appliqués à la poutre en FGM et la plaque composite ;  $E_1$  est le module de Young du FGM ;  $I_1$  le moment d'inertie,  $y_1$  est la distance entre l'axe neutre à la fibre inférieure du FGM,  $N_1$  et

$N_2$  sont les forces axiales appliquées au FGM 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 (FGM), nous aurons :

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

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

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

Où  $V_1(x)$  est l'effort tranchant de la poutre en FGM,  $\sigma(x)$  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 FGM.

$$\text{Le moment d'équilibre: } \frac{dM_1}{dx} = V_1(x) - \tau(x)b_2 \cdot y_1 \quad (\text{IV.5})$$

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

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

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

$$\text{Le moment d'équilibre: } \frac{dM_2}{dx} = V_2(x) - \tau(x)b_2 \cdot y_2 \quad (\text{IV.8})$$

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

#### **IV.2.1. Contraintes de cisaillement**

Le moment de flexion dans la plaque composite peut être négligé pour simplifier les opérations de dérivation de la contrainte de cisaillement. La rigidité de la plaque de renforcement est nettement inférieure à celle de la poutre en FGM à renforcer.

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

$$\tau(x) = K_s \Delta u(x) = K_s [u_2(x) - u_1(x)] \quad (\text{IV.9})$$

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

Avec :  $K_s$  est la rigidité au cisaillement de la couche d'adhésive.

$G_a$  et  $t_a$  représentant respectivement le module de cisaillement et l'épaisseur de l'adhésive

En dérivant l'expression (IV.9) nous obtenons :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \left[ \frac{du_2(x)}{dx} - \frac{du_1(x)}{dx} \right] \quad (\text{IV.11})$$

En substituant les équations (IV.1) et (IV.2) dans l'équation (IV.11) nous aurons :

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

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 :

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

Avec :

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

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

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

Où  $M_T(x)$  représente le moment total appliqué à la poutre hybride (FGM - Composite).

$N(x)$  est donné par l'expression suivante :

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

Le moment fléchissant dans chaque adhérent est exprimé en fonction du moment total appliqué et de la contrainte de cisaillement à l'interface

En remplaçant les équations (V.3), (V.6), et (V.13) dans l'équation (V.15), On tire :

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

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

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

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = V_1(x) = \frac{R}{(R+1)} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (\text{IV.19})$$

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = V_2(x) = \frac{1}{(R+1)} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (\text{IV.20})$$

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

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} = K_S \left[ \frac{y_2}{E_2 I_2} \frac{dM_2(x)}{dx} + \frac{1}{E_2 A_2} \frac{dN_2(x)}{dx} - \frac{t_2}{3G_2} \frac{d^2 \tau_a}{dx^2} - \frac{y_1}{E_1 I_1} \frac{dM_1(x)}{dx} + \frac{1}{E_1 A_1} \frac{dN_1(x)}{dx} - \frac{t_1}{3G_1} \frac{d^2 \tau_a}{dx^2} \right] \quad (\text{IV.21})$$

La substitution des forces de cisaillement des équations (IV.19) et (IV.20) et les forces axiales de l'équation (IV.16) dans l'équation (IV.21) nous donne l'équation différentielle régissant les contraintes de cisaillement d'interface suivante :

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

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

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

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

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

$$\text{Et : } m_1 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left( \frac{y_1 + y_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (\text{IV.26})$$

La formule de la contrainte de cisaillement pour une charge uniformément répartie est donnée par :

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

$$m_2 = \frac{K_1 y_1}{E_1 I_1} \quad (\text{IV.28})$$

#### IV.2.2. Contraintes normales

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

$$\sigma_n(x) = K_n \Delta w(x) = K_n [w_2(x) - w_1(x)] \quad (\text{IV.29})$$

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

$$K_n = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)} = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)/t_a} \left( \frac{1}{t_a} \right) = \frac{E_a}{t_a} \quad (\text{IV.30})$$

$w_1(x)$  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 :

$$\frac{d^2 \sigma_n(x)}{dx^2} = \left[ \frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} - \frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} \right] \quad (\text{IV.31})$$

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

$$\frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} = -\frac{M_1(x)}{E_1 I_1}, \quad \frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} = -\frac{M_2(x)}{E_2 I_2} \quad (\text{IV.32})$$

En substituant les dérivées des équations (IV.4), (IV.5) et (IV.7) (IV.8) dans l'équation (IV.32) dérivée deux fois, on obtient :

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

$$\text{Adhérent 1 : } \frac{d^4 w_1(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_1 I_1} b_2 \sigma_n(x) + \frac{y_1}{E_1 I_1} b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_1 I_1} \quad (\text{IV.33})$$

$$\text{Adhérent 2 : } \frac{d^4 w_2(x)}{dx^4} = -\frac{1}{E_2 I_2} b_2 \sigma(x) + \frac{y_2}{E_2 I_2} b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (\text{IV.34})$$

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 :

$$\frac{d^4 \sigma_n(x)}{dx^4} + K_n \left( \frac{b_2}{E_1 I_1} + \frac{b_2}{E_2 I_2} \right) \sigma_n(x) - K_n \left( \frac{b_2 y_1}{E_1 I_1} + \frac{b_2 y_2}{E_2 I_2} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q K_n}{E_1 I_1} = 0 \quad (\text{IV.35})$$

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

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{IV.36})$$

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 :

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{IV.37})$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_n}{4} \left( \frac{b_2}{E_1 I_1} + \frac{b_2}{E_2 I_2} \right)} \quad (\text{IV.38})$$

$$n_1 = \left( \frac{E_2 I_2 y_1 - E_1 I_1 y_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \quad (\text{IV.39})$$

$$n_2 = \frac{E_2 I_2}{b_2 (E_1 I_1 + E_2 I_2)} \quad (\text{IV.40})$$

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

$$C_1 = \frac{K_n}{2\beta^3 E_1 I_1} [V_T(0) + \beta M_T(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left( \frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \quad (\text{IV.41})$$

$$C_2 = \frac{K_n}{2\beta^2 E_1 I_1} M_T(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad (\text{IV.42})$$

Où :

$$n_3 = b_2 K_n \left( \frac{y_1}{E_1 I_1} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \right) \quad (\text{IV.43})$$

✚ *La loi de mélange de matériaux composites à base de fibre utilisé*

$$\begin{aligned} E_2 &= E_f V_f + E_m V_m \\ V_f + V_m &= 1 \end{aligned} \quad (\text{IV.44})$$

$E_m$  : Module de Young des matrices ;  $E_f$  : Module de Young des fibres ;

$V_f$  : Fraction volumique des fibres ;  $V_m$  : Fraction volumique des matrices.

✚ *La loi de mélange du matériau FGM*

$$E_1 = (E_c - E_m) (z/h + 0.5)^k + E_m - (E_c - E_m) P/2 \quad (\text{IV.45})$$

La plaque FGM est faite d'aluminium et d'alumine présentant les propriétés suivantes :

**Alumine,  $Al_2O_3$**  :  $E_c = 380\,000$  MPa ; **Aluminium, Al** :  $E_m = 70\,000$  MPa ; P est l'indice de porosité varié entre 0 et 0.3;  $h = t_1 = 300$  mm ;  $z = 0$  mm ;  $K = 5$  ;

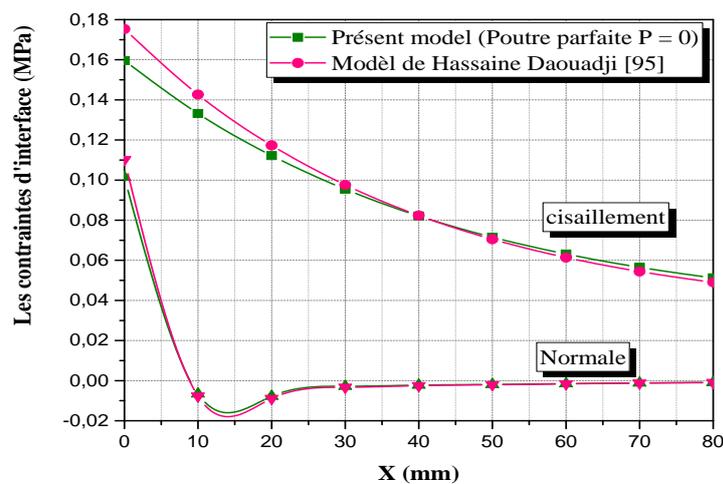
### IV.3. Validation du modèle Proposée

Pour une poutre console en FGM sous une charge répartie d'une valeur de 30 KN/m renforcée par différents types de composites est analysée. La poutre, ayant une travée de 1500 mm. La distance de l'appui au bord de la plaque de renforcement (a) est de 500 mm. Les caractéristiques physiques et les propriétés mécaniques des matériaux utilisés sont rapportées au tableau suivante :

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

Matériaux	Largeur (mm)	Hauteur (mm)	Module de Young (MPa)	Coefficient de poisson	Module de cisaillement (MPa)
<b>Poutre en FGM</b>	$b_1 = 200$	$t_1 = 300$	$E_1 = 79688$	0,3	$G_1 = 30649$
<b>Adhésif</b>	$b_a = 100$	$t_a = 2$	$E_a = 3\,000$	0,35	$G_a = 1111,1$
<b>CFRP</b>	$b_2 = 100$	$t_2 = 4$	$E_2 = 140\,000$	0,28	$G_2 = 5000$
<b>GFRP</b>	$b_2 = 100$	$t_2 = 4$	$E_2 = 73\,000$	0,28	$G_2 = 5000$

Le présent modèle (poutre parfaite  $P = 0$ ) a été validée en comparant les résultats des contraintes d'interface avec ceux obtenus à partir du modèle de Hassaine Daouadji [95].



*Figure IV.3: La comparaison entre le présent modèle et le modèle de Hassaine Daouadji[95]*

### IV.4. Etude paramétrique

#### IV.4.1. Effet de la longueur *a*

L'influence de la longueur « *a* » sur les contraintes d'interface maximales est présentée sur la figure IV.4 et le tableau IV.2. On constate que, pour les deux cas de poutres, plus la longueur « *a* » augmente plus les contraintes d'interface maximales s'accroissent d'une façon significative.

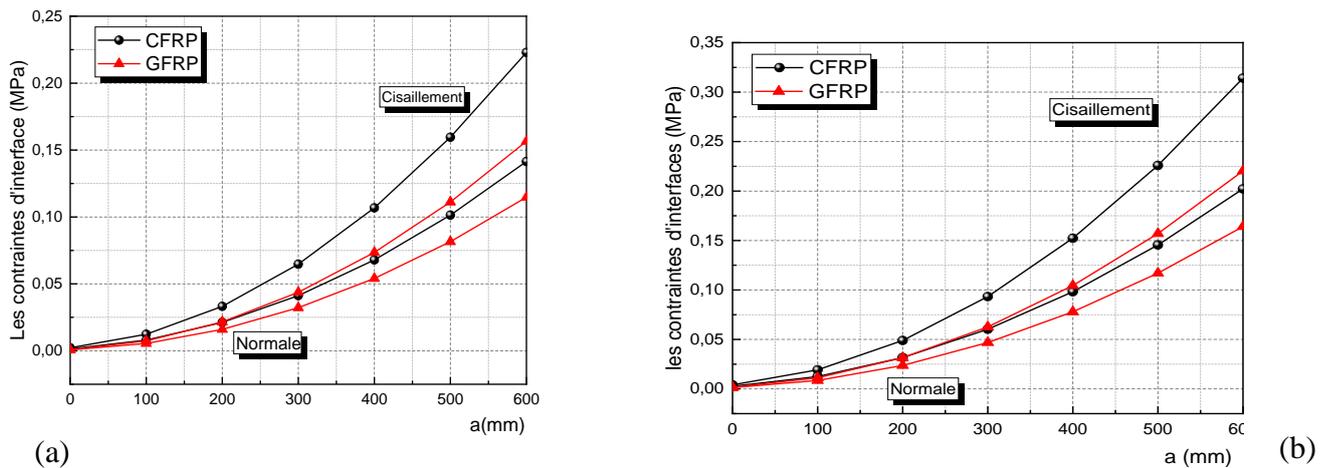


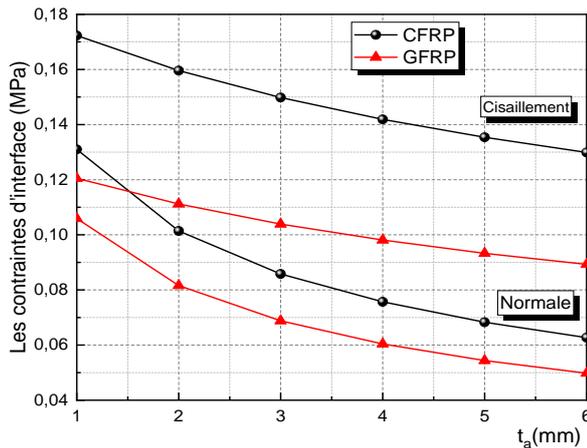
Figure IV.4: L'influence de la longueur *a* sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par différents types de composites : (a) Poutre Parfaite (b) Poutre imparfaite

Tableau IV.2 : L'influence de la longueur (*a*) sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par différents types de composites

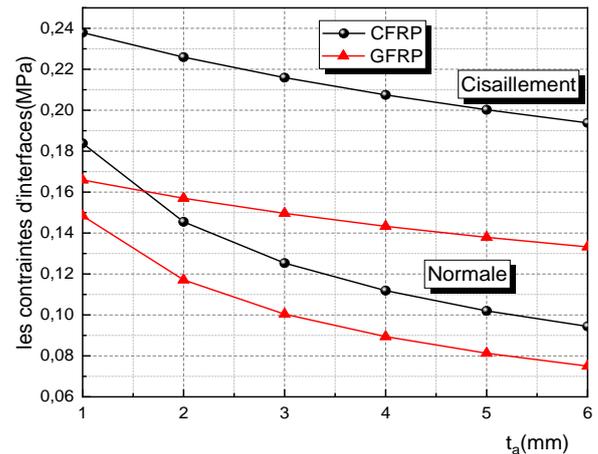
a(mm)	Poutre parfaite P = 0				Poutre imparfaite P = 0.2			
	CFRP		GFRP		CFRP		GFRP	
	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
0	0,00220	0,00144	0,00086	0,00066	0,0041	0,0027	0,0016	0,0013
100	0,01239	0,00799	0,00736	0,00550	0,0192	0,0125	0,0112	0,0085
200	0,03323	0,02126	0,02164	0,01600	0,0490	0,0317	0,0316	0,0237
300	0,06470	0,04124	0,04370	0,03219	0,0933	0,0603	0,0626	0,0468
400	0,1068	0,06794	0,07354	0,05403	0,1523	0,0982	0,1045	0,0779
500	0,15956	0,10135	0,11117	0,08155	0,2259	0,1455	0,1570	0,1170
600	0,22295	0,14148	0,15658	0,11473	0,3141	0,2022	0,2203	0,1641

IV.4.2. Effet de l'épaisseur de la colle d'adhésive  $t_a$ 

L'effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive «  $t_a$  » sur la variation des contraintes d'interface maximales est présenté sur la figure (IV.5) et le tableau (IV.3). Pour les deux cas de poutres lorsque l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésive «  $t_a$  » mène à une réduction significative des contraintes d'interface maximale.



(a)



(b)

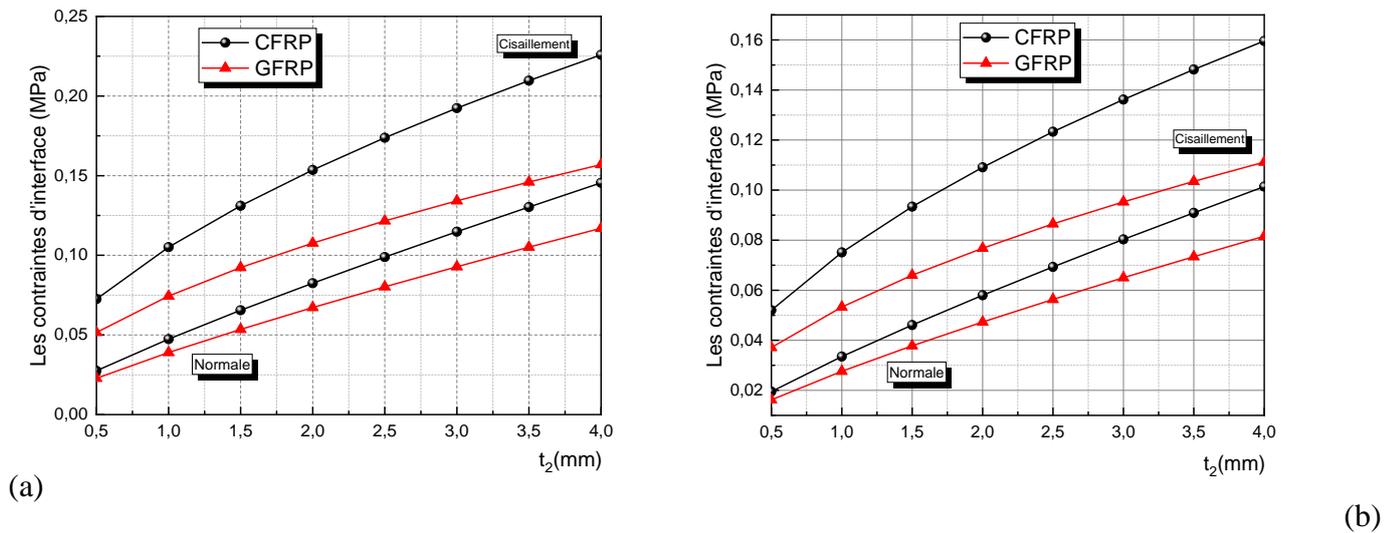
*Figure IV.5: Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésive  $t_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par composites : (a) Poutre parfaite, (b) Poutre imparfaite.*

*Tableau IV.3 : L'influence de l'épaisseur de la couche d'adhésive  $t_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par différents types de composites*

$t_a$ (mm)	Poutre parfaite P = 0				Poutre imparfaite P = 0.2			
	CFRP		GFRP		CFRP		GFRP	
	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
1	0,1723	0,1310	0,1205	0,1059	0,2379	0,1838	0,1659	0,1484
2	0,1596	0,1014	0,1112	0,0816	0,2259	0,1455	0,1570	0,1171
3	0,1498	0,0858	0,1039	0,0688	0,2159	0,1253	0,1496	0,1004
4	0,1419	0,0757	0,0981	0,0604	0,2075	0,1119	0,1433	0,0894
5	0,1354	0,0683	0,0933	0,0544	0,2002	0,1020	0,1379	0,0813
6	0,1299	0,0627	0,0893	0,0498	0,1938	0,0944	0,1332	0,0750

**IV.4.3.Effet de l'épaisseur de la plaque  $t_2$**

L'effet de l'épaisseur de la plaque « $t_2$ » sur la variation des contraintes d'interface maximales est présenté sur la figure (IV.6) et le tableau (IV.4). Lorsque l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésive « $t_2$ » mène à une augmentation des contraintes d'interface maximale pour les deux cas de poutres.



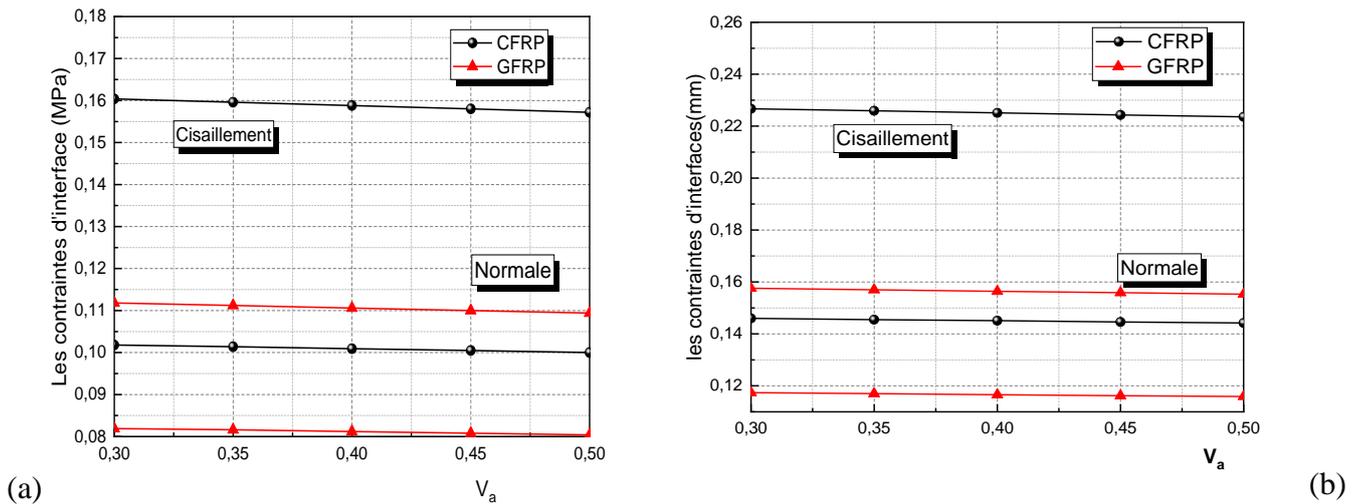
*Figure IV.6: Effet de l'épaisseur de la plaque  $t_2$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par composites : (a) Poutre parfaite, (b) poutre imparfaite.*

*Tableau IV.4 : L'influence de l'épaisseur de la plaque composite  $t_2$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par différents types de composites.*

$t_2$ (mm)	Poutre parfaite P = 0				Poutre imparfaite P = 0.2			
	CFRP		GFRP		CFRP		GFRP	
	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
0.5	0,0520	0,0195	0,0371	0,0162	0,0725	0,0275	0,0516	0,0228
1	0,0751	0,0335	0,0533	0,0276	0,1051	0,0474	0,0744	0,0390
1.5	0,0934	0,0461	0,0660	0,0378	0,1311	0,0655	0,0923	0,0535
2	0,1091	0,0580	0,0768	0,0473	0,1536	0,0825	0,1077	0,0672
2.5	0,1233	0,0693	0,0865	0,0563	0,1738	0,0989	0,1216	0,0802
3	0,1362	0,0803	0,0953	0,0650	0,1924	0,1148	0,1342	0,0928
3.5	0,1482	0,0909	0,1035	0,0734	0,2097	0,1303	0,1460	0,1051
4	0,1596	0,1014	0,1112	0,0816	0,2259	0,1455	0,1570	0,1170

#### IV.4.4. Effet de coefficient de poisson de l'adhésive $\nu_a$

Effet de coefficient de poisson de l'adhésive  $\nu_a$  sur les contraintes d'interface maximales est présenté sur la figure (IV.7) et le tableau (IV.5). Lorsque l'augmentation de coefficient de poisson de l'adhésive  $\nu_a$  Le maximum des contraintes normales et de cisaillement diminue légèrement pour les deux cas de poutres.



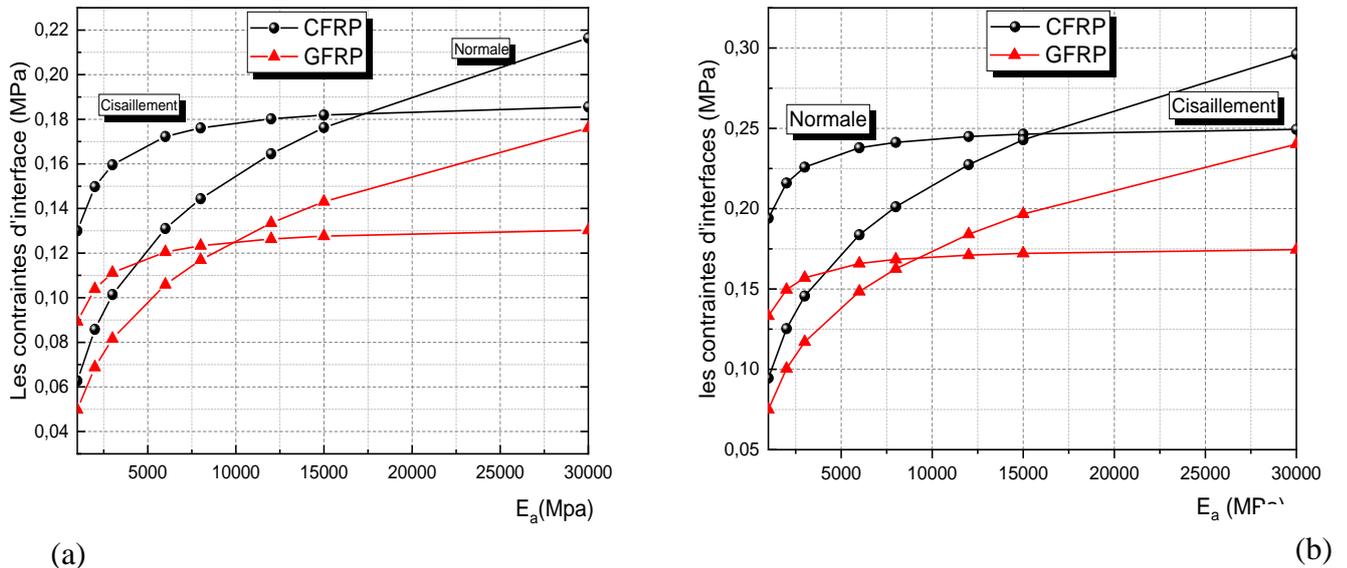
**Figure IV.7:** Effet de coefficient de poisson de l'adhésive  $\nu_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par composites : (a) Poutre parfaite, (b) Poutre imparfaite.

**Tableau IV.5** l'influence effet de coefficient de poisson de l'adhésive  $\langle \nu_a \rangle$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM endommagée renforcée par différents types de composites.

	Poutre parfaite P = 0				Poutre imparfaite P = 0.2			
	CFRP		GFRP		CFRP		GFRP	
$\nu_a$	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
<b>0.3</b>	0,1604	0,1018	0,1118	0,0819	0,2267	0,1460	0,1576	0,1174
<b>0.35</b>	0,1596	0,1014	0,1112	0,0816	0,2259	0,1455	0,1570	0,1170
<b>0.4</b>	0,1588	0,1009	0,1106	0,0812	0,2251	0,1451	0,1564	0,1166
<b>0.45</b>	0,1580	0,1005	0,1100	0,0808	0,2243	0,1446	0,1559	0,1162
<b>0.5</b>	0,1572	0,1000	0,1094	0,0804	0,2236	0,1442	0,1553	0,1159

**IV.4.5. Effet de la rigidité de la colle d'adhésive**

L'effet de la rigidité de la colle « $E_a$ » sur les contraintes d'interface maximales est présentées sur la figure IV.8 et le tableau IV.6. Lorsque la rigidité de la colle augmente plus les contraintes d'interface maximales s'accroissent clairement pour les deux cas de poutres.



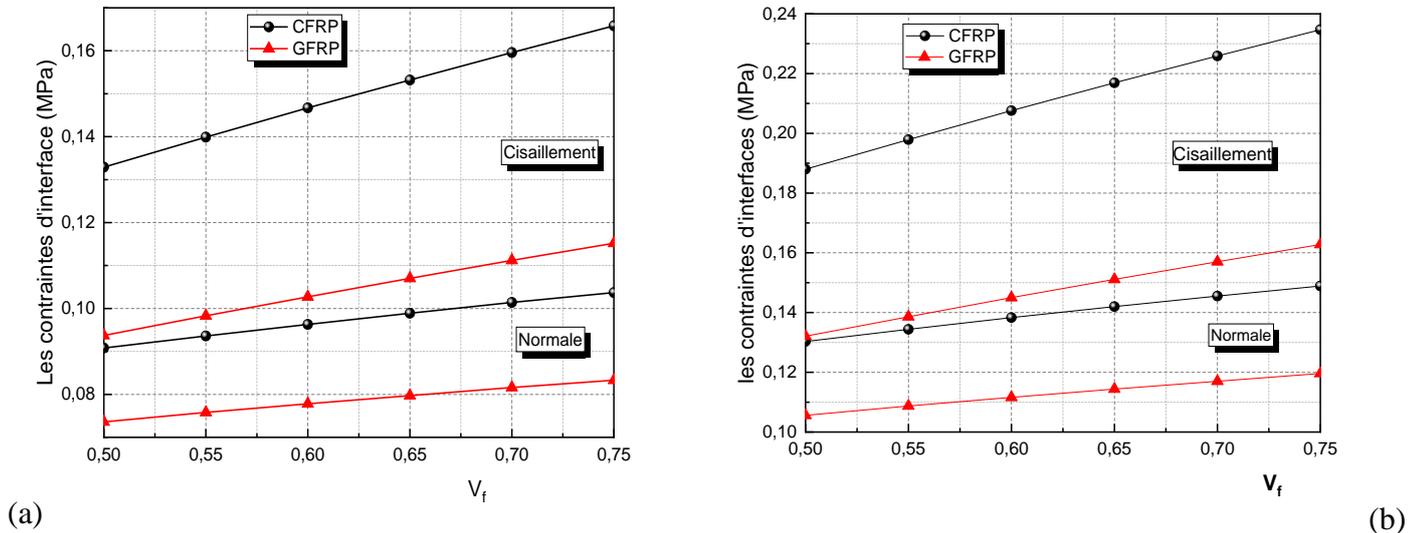
**Figure IV.8:** Effet de la rigidité de la colle d'adhésive  $E_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par composites : (a) Poutre parfaite ; (b) poutre imparfaite.

**Tableau IV.6 :** L'influence de la rigidité de la colle d'adhésive  $E_a$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par différents types de composites.

$E_a$ (MPa)	Poutre parfaite P = 0				Poutre imparfaite P = 0.2			
	CFRP		GFRP		CFRP		GFRP	
	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
<b>1000</b>	0,1300	0,0627	0,0893	0,0498	0,1940	0,0945	0,1332	0,0750
<b>2000</b>	0,1498	0,0858	0,1039	0,0688	0,2160	0,1253	0,1496	0,1004
<b>3000</b>	0,1596	0,1014	0,1112	0,0816	0,2259	0,1456	0,1570	0,1171
<b>6000</b>	0,1723	0,1310	0,1205	0,1059	0,2379	0,1838	0,1659	0,1484
<b>8000</b>	0,1761	0,1444	0,1233	0,1169	0,2413	0,2012	0,1684	0,1626
<b>12000</b>	0,1802	0,1645	0,1263	0,1335	0,2449	0,2274	0,1711	0,1841
<b>15000</b>	0,1819	0,1763	0,1276	0,1431	0,2464	0,2429	0,1722	0,1967
<b>30000</b>	0,1856	0,2165	0,1303	0,1761	0,2494	0,2962	0,1745	0,2402

**IV.4.6. Effet de la fraction volumique  $V_f$**

L'effet de la fraction volumique des fibres  $V_f$  sur les contraintes d'interface maximales est présenté sur la figure IV.9 et le tableau IV.6. Lorsque la fraction volumique des fibres  $V_f$  accroisse plus les contraintes d'interface maximales augmentent pour les deux cas de poutres.



**Figure IV.9:** Effet de la fraction volumique des fibres  $V_f$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par composites : (a) poutre parfaite (b) Poutre imparfaite

**Tableau IV.7:** l'influence effet de la fraction volumique des fibres  $V_f$  sur les contraintes d'interface pour une poutre console en FGM renforcée par différents types de composites.

$V_f$	Poutre parfaite P = 0				Poutre imparfaite P = 0.2			
	CFRP		GFRP		CFRP		GFRP	
	Contrainte de cisaillement	Contrainte normale						
<b>0.5</b>	0,1329	0,0908	0,0937	0,0736	0,1880	0,1303	0,1321	0,1056
<b>0.55</b>	0,1399	0,0936	0,0983	0,0758	0,1979	0,1344	0,1386	0,1087
<b>0.6</b>	0,1467	0,0963	0,1027	0,0778	0,2076	0,1383	0,1450	0,1116
<b>0.65</b>	0,1532	0,0989	0,1070	0,0797	0,2169	0,1420	0,1511	0,1144
<b>0.7</b>	0,1596	0,1014	0,1112	0,0816	0,2259	0,1455	0,1570	0,1170
<b>0.75</b>	0,1658	0,1037	0,1152	0,0833	0,2347	0,1489	0,1628	0,1196

## IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, une nouvelle analyse théorique des contraintes d'interface dans une poutre console en FGM renforcée par différents types de composites a été présentée.

Une étude paramétrique était étudiée dans ce chapitre pour voir les différents paramètres qui influent sur le comportement d'une poutre en FGM renforcée par différents types des composites.

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

- 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.
- La longueur « a » augmente plus les contraintes d'interface maximales s'accroissent d'une façon significative. Donc il faut Prolonger le plus possible de la longueur de la plaque de renforcement aux appuis pour réduit les contraintes aux bords.
- Le maximum des contraintes normales et de cisaillement diminue à mesure que l'épaisseur de la couche d'adhésive «  $t_a$  ».
- Lorsque l'augmentation de l'épaisseur de la plaque «  $t_2$  » mène à une augmentation des contraintes d'interface maximale.
- Le maximum des contraintes normales et de cisaillement d'interface diminue avec L'accroissement de coefficient de poisson de l'adhésive  $\nu_a$ .
- Le maximum des contraintes normales et de cisaillement d'interface augmente avec L'accroissement de la rigidité de la colle  $E_a$ .
- Les contraintes d'interface maximales augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique des fibres  $V_f$ .

## *Conclusion générale*

## Conclusion générale

La durée d'exploitation des ouvrages en béton armé est à priori comprise entre 50 et 120 ans selon sa composition et sa fonction, La présence d'un milieu agressif et l'augmentation des charges de trafic sont des principales causes contribuées à leur détérioration. Les ingénieurs en structure font face à ces problèmes fréquents.

Pour faire face à ces problèmes et augmenter la capacité portante, tandis que le remplacement d'une structure est généralement une solution coûteuse, des techniques de réhabilitation sont mises en œuvre pour renforcer les structures existantes en améliorant leurs performances et leur durabilité.

L'influence des paramètres liés à la géométrie (longueur, épaisseur et largeur) de la plaque de renfort, l'épaisseur et la rigidité de la couche adhésive, la hauteur et la rigidité de la poutre et la fraction volumique des fibres. Afin de compléter cette étude paramétrique, afin de prouver l'influence de divers paramètres sur la répartition des contraintes d'interfaces dans les poutres composites en FGM.

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

- 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.
- La longueur « a » augmente plus les contraintes d'interface maximales s'accroissent d'une façon significative. Donc, prolonger le plus possible la longueur de la plaque de renforcement aux appuis, réduit les contraintes aux bords.
- Le maximum des contraintes normales et de cisaillement diminue à mesure que l'épaisseur de la couche d'adhésif «  $t_a$  ».
- Lorsque l'augmentation de l'épaisseur de la plaque «  $t_2$  » mène à une augmentation des contraintes d'interface maximale.
- Le maximum des contraintes normales et de cisaillement d'interface diminue avec l'accroissement de coefficient de poisson de l'adhésive «  $\nu_a$  ».
- Le maximum des contraintes normales et de cisaillement d'interface augmente avec l'accroissement de la rigidité de la colle «  $E_a$  ».

- L'augmentation de la fraction volumique des fibres «  $V_f$  » augmente avec les contraintes d'interfaces.

En perspective à ce travail,

- ✓ Mener une étude expérimentale de poutre console en génie civil renforcés par matériau composite.
- ✓ Utiliser la méthode des éléments finis pour une analyse plus précise de sections de poutre renforcés par matériau composite.
- ✓ Faire une étude numérique pour une poutre console en génie civil renforcée par composite.

## Référence bibliographique

- [1] **Jean-Pierre Ollivier et Angélique Vichot**, La durabilité des bétons, Association Technique de l'Industrie des Liant Hydrauliques, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 868, Paris,2008.
- [2] **AIT AMAR MEZIANE Mohamed**.2021. Université Ibn Khaldoun Tiaret, Département génie civil « cours de pathologie et Réhabilitation des ouvrages d'art 2 -ème année Master vois et ouvrages d'arts.
- [3] **Mehta P.K, Paulo J.M** "Concrete Micro structure, properties and materials" 3rd edition, The McGraw-Hill Companies, Inc. U.S.A,2006.
- [4] **Guedon (J.S.), Martineau (F.) et LE Roux (A.)**. – Visualisation des produits de l'alcali réaction par fluorescence. Extension de la méthode au diagnostic sur ouvrage. Bulletin de liaison des LPC no 179, p.21-29, Mai Juin 1992.
- [5] **ZIDANI M'hamed Berrezoug**.2017 « Simulation Par Éléments Finis Des Poutres En Béton Armé Renforcées Par Des Plaques FRP ». Thèse Doctorat, Université Djilali liabes de Sidi-Bel-Abbès.
- [6] **Mustafa Çullu., Metin Arslan.**, The effects of chemical attacks on physical and mechanical properties of concrete produced under cold weather conditions, Construction and Building Materials, 2014; 57 (2) 53-60.
- [7] Document technique SIKA El-Djazair année2002
- [8] **ITMAIZEH Ehab** .2016 « Pathologie de structures en béton armé ». Mémoire de Master Académique, Université de Larbi Tébéssi.
- [9] **Peter H. Emmons.**, Concrete Repairer and maintenance illustrated, R.S. MEANS COMPANY, ING., Construction Published & Consultations, Copyright 1994, 100 Construction Plaza, P.B. Box 800, Kingston, MA 02364-0800.
- [10] **Mailvaganam, N. P.** Repair and Protection of Concrete Structures, CRC Press,1991, 473p.
- [11] Cours de Durabilité et réparations du béton de l'Université de Sherbrooke (Canada). Site Internet : [www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/338](http://www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/338) page
- [12] **Tarek.Djedid**.2012 « Etude de l'effet de la corrosion des armatures sur la durabilité des ouvrages en béton armé ». Mémoire de magister, Université Mohamed Khider de Biskra.
- [13] **Nassima KHAL**.2016 « Utilisation des méthodes non destructives pour la caractérisation des bétons dans un environnement agressif ». Thèse Doctorat, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
- [14] **BOUTARAA.Zohra**.2019 « Pathologies et réhabilitation des ponts ».polycopié, Master travaux publics spécialité voies et ouvrages d'Art, université Hassiba Benbouali de Chlef.
- [15] structure, rencontres scientifique, SOCOTEC-CTC année 2002.
- [16] **TOUATI Mahmoud**.2015 « Etude et analyse des différents types de renforcement dans les poutres –ponts ». Thèse Doctorat, Université Djilali liabes de Sidi-Bel-Abbès.
- [17] « Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique » Recommandations techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages premier semestre 1992

[18] Ngo, M. D. (2016). Renforcement au cisaillement des poutres béton armé par matériaux composites naturels (fibre de Lin). Doctoral dissertation, Université de Lyon.

[19] **SIDNEY M. JOHNSON**, " Dégradation, entretien et réparation des ouvrages du génie civil", Editions Eyrolles, 1969.

[20] **JEAN CHAUDESAIGUES**," Renforcer ou réparer une structure : Pourquoi et comment", Annales N° 411, Tome 1,1983, (4-25).

[21]. **JEAN PERRET**," Guide de la maintenance de bâtiments", Editions du Moniteur,1997, (59-119).

[22]. **Bertrand SCHWARTZ**, "Réhabilitation des bâtiments. Structures et enveloppe, solutions techniques", Edition Lavoisier, 2010.

[23] **Kesteloot Stephan** (2005), « Réhabilitation des ouvrages d'assainissement par matériaux composites : Etude expérimentale et dimensionnement par calculs numériques », Thèse de Doctorat, Université d'Artois.

[24] « Etude du comportement mécanique des poutres fissurées et réparées par des matériaux composites ». Thèse Doctorat, Université Djilali Liabes de Sidi- Bel-abbès.

[25] **A. PLUMIER**, pathologie et réparations structurelles des constructions, ArGenCo, édition 2006.

[26] **J.A. CALGARO**, maintenance et réparation des ponts, ENPC, année 1997.

[27] Avis technique, CSTB, 2008.

[28] « Contribution à l'étude des matériaux composite dans le renforcement et la réparation des éléments structuraux linéaires en béton ». Thèse Doctorat, Université Mentouri de Constantine.

[29] **A. Gabor** (2002), « Contribution à la caractérisation et à la modélisation des maçonneries non-renforcées et renforcées par matériaux composites », Thèse Doctorat, Lyon1

[30] Annales des Ponts des Chaussées, 1834, 1836, 1854 et 1856, Bibliothèque Centrale des Ponts et Chaussées

[31] Restructuration des collecteurs visitables (2002, 2004), Guide technique, Tomes 1&2, Projet National RERAU.

[32] **Bahlouli, N.**, « Comportement mécanique en température du pli élémentaire d'un stratifié carbone/époxy », 1994, Cachan, Ecole normale supérieure.

[33] **Saidi Hayat** « Analyse de l'influence du cisaillement transverse et des déformations normales sur le comportement thermomécanique des plaques FGM» Thèse de Doctorat de l'université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès, 2015.

[34] **Damien Ducret**, « Elasticité anisotrope et endommagement des matériaux composites, caractérisation ultrasonore et modélisation micromécanique » Thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées, Lyon, 2000.

[35] **CHOUAIB. Aribi**, Etude comparative du comportement des différents matériaux composites (différentes matrices). Mémoire de magister, université de M'hamed Bouguera, Boumerdes. Algérie.

[36] **A. AL-Maghrabi**, Comportement des matériaux composites à fibres courtes : applications à l'impact basse vitesse, thèse de doctorat, l'université Paul Sabatier, 2008

[37] **J.M. Berthelot**. Composite Materials. Mechanical Behavior and Structural Analysis, New York ,1999

[38] **K.Charle, C.morvan, J.Bréard, JP.Jernot, M.Gomina,** "Etude morphologique d'un composite naturel la fibre de lin" revue des composites et des matériaux avancées, Vol16, pp11-24,2006

[39] **BOUAKKAZ Khaled.2015** « analyse et modélisation par éléments finis du comportement mécanique des poutres métalliques renforcées par collage externe des plaques composites ». Thèse Doctorat, Université Djilali liabes de sidi bel Abbes

[40] **HAMIANI Ahmed.2012** « Modèle non linéaire de la rupture par décollement dans les poutres en composite sous chargement de flexion ».Mémoire de Magister, université Mohamed BOUDIAF d'Oran

[41] **Laarej Merad.2010** « Etude par spectroscopie Raman et modélisation d'une résine composite RTM ». Thèse Doctorat, Université Abou Bakr BELKAID de Tlemcen.

[42] « Glossaire des matériaux composites » - carma –Actualisation octobre 2006.

[43] **Laurent gornet,** « Généralités sur les matériaux composites », ECN, Centre Nantes 2008.

[44] **O. Gallot-lavallee,** Etude de la charge d'espace et des phénomènes luminescents comme précurseurs du vieillissement électrique d'une résine époxy utilisée dans l'isolation haute tension, thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse 2006

[45] **Abdelmadjid Si Salem,** « Développement d'une poutre en béton-composite : analyse expérimentale et modélisation » Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.

[46] **Shahistha A, Varghese B, Baby A** 2014 A review on functionally graded materials The International Journal Of Engineering And Science (IJES), Volum e 3,Issue 6, Pages 90-101, ISSN (e): 2319 – 1813 ISSN (p): 2319 – 1805

[47] **M. KOIZUMI,** "FGM activities in Japan." Composites Part B: Engineering, 1997, vol. 28, no 1-2, p. 1-4.

[48] **H. . Yin, L.. Sun, and G. . Paulino,** "Micromechanics-based elastic model for functionally graded materials with particle interactions," Acta Materialia, vol. 52, no. 12, pp. 3535– 3543, Jul. 2004, doi: 10.1016/j.actamat.2004.04.007.

[49] **L. S. Liu, Q. J. Zhang, and P. C. Zhai,** "The optimization design on metal/ceramic FGM armor with neural net and conjugate gradient method," Materials Science Forum. Vol. 423. Trans Tech Publications Ltd, 2003.

[50] **B. Paszkiewicz et al.,** "Functionally graded semiconductor layers for devices application," Vacuum, vol. 82, no. 4, pp. 389–394, 2007.

[51] **S. Uemura,** "The activities of FGM on new application,"2003, In Materials Science Forum (Vol. 423, pp. 1-10). Trans Tech Publications Ltd.

[52] **T. Hirai and L. Chen,** "Recent and prospective development of functionally graded materials in Japan."Materials science Forum, 1999, vol. 308, pp. 509–514

[53] **E. Autissier,** "Elaboration de matériaux à gradient de propriétés fonctionnelles pour les composants face au plasma des machines de fusion thermonucléaires," 2014. Thèse de doctorat. Dijon.

[54] **Zemani Kada et Sebakhi Faiza** «Etude des vibrations libres des plaques épaisses en matériaux à gradient fonctionnel (FGM) reposant sur un support élastique de WinklerPasternak» Mémoire de Master de Institut d'aéronautique et des études spatiales Blida, 2015

[55] **M. Tokita**, “Development of large-size ceramic/metal bulk FGM fabricated by spark plasma sintering.” *Materials science Forum*, 1999, vol. 308, pp. 83–88.

[56] **TAKAHASHI. M.ITOH. Y KASHIWAYA** fabrication and evaluation of w/cu gradient material by sintering and infiltration technique , in proceeding of the first international symposium on functionally gradient materials Japan 1990

[57] **J. F. Groves, and H. N. G. Wadley** 1997 Functionally graded materials synthesis via low vacuum directed vapor deposition *Composites Parts B* 28B, (1997), 57-69.

[58] **R. Knoppers, J. W. Gunnink, J. Van den Hout**, and W. Van Vliet The reality of functionally graded material products TNO ScienceandIndustry, The Netherlands, pp 38-43

[59] **Zhu J, Lai Z, Yin Z, Jeon J, and Lee S** Fabrication of ZrO<sub>2</sub>-NiCr functionally graded material by powder metallurgy *Materials Chem. Phys.* 68 130. Crossref.

[60] **Watanabe Y, Inaguma Y, Sato H, and Miura-Fujiwara E** 2009 Novel fabrication method for functionally graded materials under centrifugal force: the centrifugal mixed-Powder method *Materials*, Vol. 2, No. 4, pp.2510-2525.

[61] **Bhavar V, Kattire P, Patil V, Khot S, Gujar K, Singh R** 2014 A Review on Powder bed fusion technology of metal additive manufacturing AMSI Conference 2014, Banglore, India.

[62] **Mahamood, R.M. and Titilayo Akinlabi E.**( 2017), "Functionally Graded Materials, Types of Functionally Graded Materials and Their Areas of Application (chapter2)", Springer International Publishing AG, Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering, DOI 10.1007/978-3-319-53756-6\_2

[63] **Bharti, I., N. Gupta, K. M. Gupta.**( 2013) "Novel Applications of Functionally Graded Nano, Optoelectronic and Thermoelectric Materials", *Int. J. of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 1, 221-224.

[64] **Mahamood, R.M., Akinlabi, E.T.:** Laser-metal deposition of functionally graded Ti6Al4V/TiC. *Mater. Des.* 84, 402–410 (2015).

[65] **Mahamood, R.M., Akinlabi, E.T., Shukla M., Pityana, S.:** Functionally graded material: An overview. In: *Proceedings of the world congress on engineering WCE 2012*, vol. 3, pp. 1593– 1597 (2012).

[66] **Schneider, M.J.:** The Timken Company, and Madhu S. Chatterjee, bodycote introduction to surface hardening of steels. In: *Dossett, J., Totten, G.E. (eds) ASM Handbook, Steel Heat-Treating Fundamentals and Processes*, vol. 4 (2013).

[67] **Lu, L., Chekroun, M., Abraham, O., Maupin, V., Villain, G.:** Mechanical properties estimation of functionally graded materials using surface waves recorded with a laser interferometer. *NDT and E Int.* 44(2), 169–177 (2011) .

[68] **E. Lolive.** «Analyse du comportement non linéaire de poutres en matériaux composites sandwichs avec âme en mousse» Thèse de doctorat de l’université de Nantes, 2000.

[69] **Menasria Abderrahmane** «Etude de l’effet de la Microstructure Sur le Flambement Thermique des Plaques Fonctionnellement Graduées» Thèse de Doctorat de l’université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, 2018.

[70] **Bao., G. , Wang, L.**( 1995) "Multiple cracking in functionally graded ceramic/metal coatings", *Int. J; Solids Structures*; 32 (19): 2853–2871,.

[71] **Zemani Kada et Sebakhi Faiza** «Etude des vibrations libres des plaques épaisses en matériaux à gradient fonctionnel (FGM) reposant sur un support élastique de WinklerPasternak» Mémoire de Master de Institut d'aéronautique et des études spatiales Blida, 2015.

[72] **Chi. Shyang-ho., Chung Yen-Ling,** (2003) "Cracking in coating-substrate composites of multi-layered and sigmoid FGM coatings". *Engineering Fracture Mechanics*; 70 (10), 1227–1243,

[73] **Delale F, Erdogan F.**(1983), "The crack problem for a non homogeneous plane". *ASME JAppl Mech*; 50:609–14.

[74] **Ayache Belqassim** «Analyse des propriétés statiques et dynamiques des structures FGM épaisses en utilisant des modèles de déformation de cisaillement d'ordre élevé» Thèse de Doctorat de l'université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, 2019.

[75] **Philippe Sanchez** Mise en œuvre et illustrations de la théorie exacte des poutres 2001 à Cachan, Ecole normale supérieure.

[76]. **TEKILI Sabiha 2017,** « Comportement sous sollicitations dynamiques des structures renforcées par matériaux composites »,Thèse de doctorat, universite Badji Mokhtar – Annaba

[77]. **Raof, M. Hassenen, M.A.H.** « Peeling failure of reinforced concrete beams with fibre-reinforced plastic or steel plates glued to their soffits », *Proceedings of the institution of civil engineers-structures and buildings*, v 140, n 3, Aug 2000, p. 291-305.

[78]. **Limam, O. Foret, G. Ehrlicher, A.** « Beams Strengthened with Composite Material: A Limit Analysis Approach and Experimental Study », *Composite Structures* 59 (2003) 467-472.

[79] **Saxena, P. Toutanji, H. Noumowe, A.** « Failure analysis of FRP-strengthened RC beams », *Journal of Composites for Construction*, v 12, n 1, Jan 2008, p. 2-14.

[80]. **Yang, ZJ. Chen, JF. Proverb, D.** « Finite element modelling of concrete cover separation failure in FRP plated RC beams », *Construction and Building Materials*, v 17, n 1, 2003, p. 3-13.

[81]. **Raof, M. El-Rimawi, J. Hassenen, M.A.H.** « Theoretical and experimental study on externally plated R.C. beams  
», *Engineering Structures*, v 22, n 1, Jan 2000, p. 85-101.

[82]. **Teng, JG. Yao, J.** « Plate end debonding in FRP-plated RC beams - II: Strength model », *Engineering Structures*, v29, n 10, 2007, p. 2472-2486.

[83] **Buyukozturk O** (1998). Imaging of concrete structures. *NDT&E Int.*,

[84] **FAHSI Bouazza,** Etude expérimentale et modélisation du comportement rhéologique des matériaux composites utilisés dans le renforcement des ouvrages en génie civil. Thèse de doctorat, 2010 UDL de Sidi Bel Abbes

[85] **B.Y Gao, Q.Y Yue, B.J Wang, Y.B Chu** Poly-aluminum-silicate-chloride (PASiC)—a new type of composite inorganic polymer coagulant

[86] **P.Mukhopadhyaya, Swamy, N.** (2001), Interface shear stress: A new design criterion for plate debonding, *Journal of Composites for Construction*

[87] **Tumialan, G., Tinazzi, D., Myers, J., and Nanni, A.** (1999), "Field Evaluation of Masonry Walls Strengthened With FRP Composites at the Malcolm Bliss Hospital", Report CIES 99-8, University of Missouri-Rolla, Rolla, MO.

- [88] **Quantrill, L. C.** Holloway, A. M. Thorne. Experimental and analytical investigation of FRP strengthened beam response. Magazine of Concrete Research, 1996
- [89] **Sebastian.** Significance of mid span debonding failure in FRP-plated concrete beams. Journal of Composites for construction ASCE. July 2001
- [90] **Sahar Radfar,** Gilles Forêt, Karam Sab. Modélisation de la rupture de type peeling-off pour une poutre BA renforcée. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers Futur oscope, France. pp.185.
- [91] **Mr. Hatab Salim 2016** « Maintenance Et Réhabilitation Des Structures Par Matériaux Composites ». Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras.
- [92] **Smith, S.T.** and Teng, J.G. “Interfacial stresses in plated beams”, Eng. Struct., 23(7), 857-871. 2001.
- [93] **RABAHI. A,** Daouadji, T.H. and Rabia, B. “Analysis of interfacial stresses of the reinforced concrete foundation beams repairing with composite materials plate”, Coupled Syst. Mech., 9(5), 473-498. 2020.
- [94] **Hassaine Daouadji T,** Abderezak, R. and Rabia, B., “Flexural performance of wooden beams strengthened by composite plate”, Struct. Monit. Maintain, 7(3), 233-259. 2020.
- [95] **Hassaine Daouadji T.,** Abderezak, R., Rabia, B and Tounsi, A., “Impact of thermal effects in FRP-RC hybrid cantilever beams”, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 78, No. 5 (2021) 573-583