



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 : Matériaux et Structure

Présenté par :

BENFAHAT Cherif Khaled

SAFAR Moussa

Sujet du mémoire

***Analyse des contraintes d'interfaces dans une poutre en béton
armé endommagé renforcée par une plaque en matériau
composite FGM sous précontraint***

Soutenu publiquement ledevant le jury composé de :

Mr, SAOULA.A

Président

Mr, HASSAINE DAOUADJI .T

Rapporteur

Mr, RABAHI. A

Co - Rapporteur

Mr, BENSATALLAH. T

Examineur

Mr, ZIDOUR.M

Examineur

2016/2017

Remerciement

Tout d'abord je tien à présenter mes sincère remerciement au professeur HASSAINE DAOUADJI Taher pour le soutien qui nous a fourni, pour la confiance qu'il nous a accordé durant cette période de travail, son soutien nous a été très utile pour mène à bien ce travail.

Mes très sincères remerciements sont accordés à monsieur RABAH Abderezak pour la collaboration qui nous a été très utile.

En fin un grand merci à mes parents, mes frère et sœur, mes amis qui mon encourager à la réalisation du travail.

Dédicace

À ma mère, à mon père, à mes frères et mes sœurs

Sommaire

I.1. Introduction	1
I.2. Pathologies et principales causes des désordres affectant les ouvrages :	1
I.2.1. Dégradation des matériaux :	2
I.3. Méthodes et techniques de renforcement :	9
I.3.1. Méthodes de réparation non structurales :	10
I.3.1.1. Préparation de la surface de béton :	11
I.3.1.2. Protection des aciers :	11
I.3.1.3. Réparation du béton dégradé par apports de matériaux :	11
I.3.1.3.1. Ragraéage:	11
I.3.1.3.2. Traitement des fissures :	12
I.4.1. Méthodes de réparation structurale :	12
I.4.1.1. Réparation par béton projeté :	12
I.4.1.2. Réparation par adjonction d'armature complémentaire :	13
I.4.1.3. Réparation par précontrainte additionnelle :	13
I.4.1.4. Renforcement par collage de plats métalliques :	14
I.5. Réparation et renforcement par collage des matériaux composites :	16
I.5.1. Utilisation des composites dans le génie civil :	16
I.5.2. Remplacement des tôles métalliques par des matériaux composites à fibres de Carbone :	16
I.5.3. Application des matériaux composites pour la réparation et le renforcement des ouvrages en béton armé :	17
I.6. Conclusion :	20
II.1. Introduction :	22
II.2. Le concept d'un matériau à gradient de propriétés :	22
II.3. Domaines d'application des FGM :	24

II.4. Comparaison entre les matériaux type FGM et les matériaux composites traditionnels :	25
II.5. Méthodes de fabrication de FGM :	26
II.5.1. Coulage en Bande (Tape Casting ou Doctor-Blade) :	27
II.5.2. Coulage Séquentiel en Barbotine (Slip Casting) :	28
II.5.3. Dépôt par Électrophorèse :	28
II.5.4. Compaction Sèche des Poudres :	29
II.5.5. Projection Plasma :	30
II.5.6. Dépôt physique en phase vapeur (PVD):	30
II.5.7. Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) :	31
II.6. Revue sur les différentes lois qui régissent la variation des propriétés matérielles suivant l'épaisseur d'une plaque FGM:	32
II.6.1. Les propriétés matérielles de la plaque P-FGM :	33
II.6.2. Les propriétés matérielles de la plaque S-FGM :	34
II.6.3. Les propriétés matérielles de la plaque E-FGM :	35
II.6.2. Les propriétés matérielles de la plaque selon le modèle de Mori Tanaka :	36
III.1. Introduction.....	39
III.2. Comportement mécanique et les modes de ruptures d'une poutre en béton armé :....	39
III.3. Comportements des poutres en béton armé renforcées par des plaques en matériaux composites sous chargement statique :	41
III.4. Analyse du comportement mécanique d'une poutre renforcée :	43
III.4.1. La section centrale (1) :	43
III.4.2. La section intermédiaire (2) :	43
III.4.3. La section d'extrémité (3 et 4) :	43
III.5. Mécanismes de rupture des poutres renforcées par composites :	44
III.5.1. Rupture due à la flexion :	44
III.5.3. Rupture du composite :	44

III.5.3. Ecrasement du béton comprimé :	44
III.5.4. Rupture due au cisaillement :	45
III.5.5. Rupture due au décollement :	45
III.5.6. Séparation d'enrobage en béton :	45
III.6. Ancrage d'extrémité en utilisant des bandes en U:	47
III.7. Conclusion	49
IV.1. Introduction :	51
IV. 2. Hypothèse de la présente méthode :	51
IV.3. Les propriétés des matériaux de plaques endommagées :	51
IV.4. Analyse :	53
IV.4.1. Equations d'élasticité :	55
IV.4.2. La distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite – Béton :	56
IV.4.3 La distribution des contraintes normales dans l'interface composite – Acier	58
IV.5. Conclusion:	60
V.1. Introduction	62
V.2. Vérification de la méthode :	62
V.3. Validation :	62
V.3.1. effet de la précontrainte :	63
V.4. L'étude paramétrique :	64
V.4.1. Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésif :	64
V.4.2. Effet de l'épaisseur de la plaque FGM :	65
V.4.3. Effet de la longueur non renforcée a :	65
V.4.4. Effet de degré d'homogénéité K :	66
V.5. Conclusion :	68
Conclusion générale	69
Référence bibliographique	

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal.....	23
Tableau V.1 : Propriétés géométriques et mécaniques des matériaux.	62
Tableau V.2 : Influence de l'épaisseur de la colle sur une poutre en BA endommagée renforcée par FGM sous précontrainte $P = 80$ KN.....	64
Tableau V.3 : Influence de l'épaisseur de plaque FGM sur une poutre en BA endommagée renforcée par FGM sous précontrainte $P = 80$ KN.....	65
Tableau V.4 : Influence de la longueur non renforcée a sur une poutre en BA endommagée renforcée par FGM sous précontrainte $P = 80$ KN.	66

Liste des figures

Figure I.1 : Dégradation d'un ouvrage soumis au gel dégel	3
Figure I.2 : Carbonatation du béton et conséquences sur la structure	4
Figure I.3 : Entrée d'un tunnel, Fissurations grossières dues à l'alcali-réaction.....	6
Figure I.4 : Choc sur une pile de pont.....	7
Figure I.5 : Délamination du béton d'un hourdis de pont aboutissant à la formation d'un trou.....	8
Figure I.6: Réparation de poutre par béton projeté.....	12
Figure I.7: Réparation de poutre par adjonction d'armature.....	13
Figure I.8 : Différents types de réparation par précontrainte additionnelle.	14
Figure I.9: Renforcement d'un viaduc par tôles collées.	16
Figure I.10 : Mise en œuvre d'une réparation par stratification.....	18
Figure I.11 : Différentes méthodes de renforcement par le collage	19
Figure I.12 : le renforcement de structures au moyen de composites préfabriqués	19
FigureII.1 : La variation de la composition d'un FGM	24
Figure II.2 : Protection thermique des FGM	24
Figure II.3 : Caractéristiques des matériaux composites FGM en comparaison avec les matériaux composites conventionnels	26
Figure II.4 : La distribution composante des matériaux	26
Figure II.5 : Principe de la méthode coulage en bande.....	27
Figure II.6 : Vue schématique de l'installation d'EPD pour la production des matériaux. ...	29
Figure II.7 : Projection par plasma pour former un matériau thermoélectrique gradué. (La composition est graduée dans la direction plane).....	30
Figure II.8 : Schéma de l'installation pour la préparation d'un SiC/C FGM par le dépôt chimique en phase vapeur (CVD).....	32
Figure II.9 : Les dimensions de la plaque FGM.....	33
Figure II.10 : Variation du module de Young d'une plaque P-FGM	34

Figure II.11 : variation du module de Young d'une plaque S-FGM	35
Figure II.12 : Variation du module de Young dans une plaque E-FGM.....	36
Figure III.1. Représentation des zones des contraintes élevées d'une poutre chargée en flexion 3 ou 4 points.....	39
Figure III.2. Représentation graphique de la contrainte (σ) en fonction de la déformation (ϵ) d'un élément en béton armé.....	40
Figure III.3 : Représentation de la fissuration initiale et intermédiaire par flexion d'une poutre en béton armé (BA).	40
Figure III.4 : comparaison de comportement entre les poutres renforcées et celle non renforcées.....	42
Figure III.5 : comparaison de comportement entre différents matériaux.	42
Figure III.6 : Comportement structural d'une poutre renforcée.	43
Figure III.7 : Différents types de décollements observés sur une poutre renforcée	45
Figure III.8 : Poutre en BA renforcée - séparation de béton d'enrobage.....	46
Figure III.9 : Rupture par séparation d'enrobage de béton de poutres renforcées en variant a/B : (a) 0,10; (b) 0,15 (c) 0,25; (d) 0,35; (e) 0,50; (f) 0,75.....	47
Figure III.10 : Poutre en B.A collée avec des bandes en FRP ancrées aux extrémités.....	48
Figure III.11 : Modes des ruptures du FRP et la poutre en BA avec la bande U tenu aux extrémités.....	48
Figure IV.1 : Poutre en béton simplement appuyée renforcée par collage d'une plaque composite.	54
Figure IV.2 : un segment différentiel de la poutre renforcée par collage de composite.....	54
Figure V.1 : La validation de la présente méthode pour une poutre en béton armé non endommagée renforcée par une plaque FGM sous précontrainte $P = 0$	63
Figure V.2 : Effet de la force de précontrainte pour une poutre en béton armé endommagée réparée par une plaque FGM.....	64
Figure V.3 : L'effet de la variation de degré d'homogénéité de plaque FGM pour une poutre en béton armé endommagée réparée par une plaque FGM sous précontrainte.....	67

Liste des notations

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

A_1 : Aire de la section en béton.

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

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

B_1 et B_2 : Constantes d'intégration.

b_1 : Largeur de la poutre en béton.

b_2 : Largeur de la plaque de renforcement.

C_1 et C_2 : Constantes d'intégration.

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

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

E : Module de Young de la poutre en béton.

\bar{E} : Module de Young de la poutre en béton endommagé.

$E(z)$: Module de Young de la plaque.

P_0 : la force de précontraint.

Q_{ij} : La matrice de rigidité.

E_a : Module de Young de l'adhésif.

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

G_i ($i=1, 2$): Module de cisaillement de l'adhérent "i".

I_1 : Moment d'inertie de la section du béton.

K_s : Rigidité tangentielle de l'adhésif.

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

L : Longueur de la poutre.

L_p : Longueur de la plaque de renforcement.

$M(x)$: Moment fléchissant.

$M_1(x)$ et $M_2(x)$: les moments d'inertie et les moments fléchissant de la poutre en béton et la plaque composite.

$M_T(x)$: Moment total appliqué.

N_i ($i=1, 2$): Force longitudinale pour l'adhérent "i".

$N_1(x)$ et $N_2(x)$: les forces axiales du béton et de la plaque composite respectivement.

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

q : Charge répartie.

t_i ($i=1, 2$) : Epaisseur de l'adhérent "i".

t_a : Epaisseur de l'adhésif.

$U_1^N(x, y)$: Déplacement longitudinal dans la poutre renforcée induit par force longitudinale.

u_1 : Déplacement longitudinal à la base de la poutre en béton.

u_2 : Déplacement longitudinal à la partie supérieur de la plaque

u_1^N : Déplacement longitudinal induit par la force longitudinale à l'interface entre l'adhérent supérieur et l'adhésif.

$V(x)$: Effort tranchant.

$V1(x)$ et $V2(x)$: Effort tranchant applique dans la poutre métallique et dans la plaque composite.

$C1, C2$: constantes d'intégration déterminées par les conditions aux limites.

w_i ($i=1, 2$) : Déplacement vertical de l'adhérent "i".

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

y_i ($i=1, 2$) : Distances de la partie inférieure de l'adhérent 1 et la partie supérieure de la l'adhérent 2 à leurs centres de gravité respectifs.

ε_1 : Déformation à la base de l'adhérent 1.

ε_2 : Déformation à la partie supérieure de l'adhérent 2.

ε_1^M : Déformation, induite par le moment de flexion, de la poutre.

ε_1^N : Déformation, induite par la force longitudinale, de la poutre.

$\{\varepsilon^0\}_2$: Vecteur de déformation du plan médium de la plaque de renforcement.

$\sigma_{xy(1)}$: Contrainte de cisaillement dans la poutre.

σ_n : Contrainte normale dans l'adhésif.

γ_1 : Déformation tangentielle dans la poutre.

τ_a : Contrainte de cisaillement dans l'adhésif.

σ_1^N : Contrainte normale pour la poutre en béton.

d : la variable d'endommagement.

Résumé

Parmi les différents matériaux utilisés dans le domaine de la construction est qui sont nuisible et susceptible à la dégradation, on cite le béton qui est influencé par de nombreux facteurs pathologiques et pathogènes, dont leur origine peut être : chimique ; physique ; mécanique et d'autre qui sont accidentelle, liée à l'erreur de calcul et de conception.

La méthode de renforcement des ouvrages en béton par plaque en matériaux composites qui est apparu au dernier siècle à prouver sa valeur car elle s'avère prometteuse et efficace.

Le différent mode de rupture est le plus confirmer est qui le délaminage (décollement) de la plaque de composite qui est liée à la grande concentration des contraintes. Une telle concentration est donc plus que nécessaire afin de prédire un autre risque qui pourrai remettre la stabilité et le disfonctionnement de l'ouvrage.

Dans ce présent travail une nouvelle technique analytique qui se base sur le principe de compatibilité, qui permet d'analyse une poutre en béton armée endommagée renforcer par une plaque en matériaux a gardien de propriété sous précontraint, et le calcul des contraintes d'interface dans les deux adhérent (poutre – matériaux à gardien de propriété), différents résultats ont été comparer ainsi qu'une étude paramétrique a été faite afin de vérifier les différents paramètres influençant.

Mots-clés : Contraintes d'interface, renforcement, poutre en béton armé, matériau à gradient de propriété, endommagement, plaque en matériaux composite

Abstract

Among the various materials used in the field of construction is that are harmful and susceptible to degradation, we cite concrete that is influenced by many pathological and pathogenic factors whose origin may be: chemical; Physics; Mechanical and other that are accidental, related to the calculation error and design. The method of strengthening concrete structures with composite materials plate that appeared in the last century to prove his worth as it is promising and effective the different mode of rupture is the most confirmed is that the delamination (detachment) of the composite plate, which is related to the high concentration of stresses

Such a concentration is therefore more than necessary in order to predict another risk, which could restore the stability and malfunction of the structure.

In this, work a new analytical technique based on the principle of compatibility which allows the analysis of a damaged reinforced concrete beam reinforced by a plate made of materials guard of property under prestressed and the calculation of the interface constraints in the two adherents (beams - property-guard materials),

Different results were compared as well as a parametric study was made in order to check the different influencing parameters.

Keywords: Interface constraints, reinforcement, reinforced concrete beam, gradient property, damage, composite plate

ملخص

من بين المواد المختلفة المستخدمة في مجال البناء الغير ضارة والتي هي عرضة للتدهور الخرسانة التي تتأثر كثير من العوامل المسببة للأمراض والامراض نفسها التي يمكن أن تكون في الأصل: كيميائية؛ فيزيائية. ميكانيكية وغيرها التي هي من قبيل الصدفة، تتعلق بحساب الخطأ والتصميم و طريقة تعزيز الهياكل الخرسانية مع لوحة المواد المركبة التي ظهرت في القرن الماضي واثبتت جدارتها كما هو واعد وفعال وضع فشل مختلف هو تأكيد أن التبتين (تثنية) من لوحة المركبة والذي يرتبط إلى تركيز الضغط كبير هذا التركيز هو أكثر مما هو ضروري للتنبؤ مخاطر أخرى يمكن أن استعادة الاستقرار وخلل في العمل في العمل الحالي تقنية تحليلية جديدة تقوم على مبدأ التوافق لتحليل رافدة الخرسانة المسلحة التالفة معززة لوحة المادية المؤقتة الملكية تحت الإجهاد وحساب واجهة يؤكد في كل تمسكا (عارضة -المواد المؤقتة الملكية) وتمت مقارنة نتائج مختلفة وإجراء دراسة حدودي لاختبار مختلف المعايير المؤثرة

كلمات البحث : القيود واجهة، التعزيز ، رافدة الخرسانة المسلحة ، المواد المؤقتة الملكية ،التشوه ، لوحة المواد المركبة

Introduction générale

Plus de quatre-vingt-dix pourcent des ouvrages dans le monde sont construits en utilisant le béton armé comme un constituant principal. Cependant on réalise que la durée d'un ouvrage en béton armé est d'une centaine d'années mais cette durée de vie est limitée à cause de nombreux facteurs pathologiques et pathogènes d'où leur origine peut être : chimique ; physique, mécanique ou accidentelle.

Les ouvrages ont une durée de vie après laquelle ils vieillissent et s'endommagent. Alors que le remplacement d'une structure est généralement une solution coûteuse, les techniques de réhabilitation (réparation ou renforcement) fournissent des solutions de rechange attrayantes à la construction.

La réhabilitation peut prolonger la vie d'une structure ; si un bâtiment ou un pont doivent être remplacés, les réparations provisoires peuvent prolonger la durée de vie d'une structure à l'état critique jusqu'à ce qu'un remplacement soit opérationnel.

Diverses techniques de réhabilitation ont été développées, le béton projeté, la précontrainte additionnelle ou encore le collage de tôles d'acier se pratiquent déjà. Ensuite, une autre solution (déjà en application) pour accroître la durabilité et les performances à long terme des infrastructures consiste à intégrer les matériaux composites lors de la construction.

La réparation par collage externe des plaques composites est l'une des méthodes les plus efficaces utilisées actuellement mais présente un problème qui est le décollement de la plaque due à la concentration des contraintes au niveau de l'interface (adhérent-adhésif).

Notre présent travail de recherche a pour objectif l'analyse des contraintes d'interfaces dans une poutre en béton armé endommagée renforcée par plaque FGM collés soumis à une force de précontrainte.

Notre travail se divise en cinq chapitres :

Le premier chapitre présente les différentes techniques de réparation non structurales et structurales des ouvrages en béton armé. Une des techniques de réhabilitations les plus utilisées ; la réparation et le renforcement par collage à l'aide de plaques métalliques, comme cette technique présente quelques désavantages liés à l'acier, l'utilisation des matériaux composites à fibre de carbone peut contribuer à la réparation rapide et efficace des structures en béton armé.

Le second chapitre on définit d'une manière générale sur la nouvelle classe de composites désignée par les matériaux à gradients évalués FGM. Aussi, nous présenterons les progrès réalisés en matière de recherche scientifique ainsi que les différents procédés de fabrication et leurs intérêts à travers les secteurs de l'industrie moderne en définissant les différentes lois qui régissent ce matériau.

Le troisième chapitre est consacré à une analyse du comportement des poutres en béton armé renforcées en flexion par des plaques en matériaux composites à base de fibres de carbone, soumises à des chargements statiques, avec en particulier les différents modes de ruptures potentielles.

Quant au chapitre quatre, est consacré au développement mathématique du nouveau modèle pour le calcul des contraintes d'interface entre le béton et la plaque FGM pour une poutre en béton armé endommagée réparée par FGM sous la force de précontrainte.

Le cinquième chapitre, Validation de la présente méthode avec celle de littérature et des différentes études paramétriques sera effectuées.

Χηαπιτρε Ι

*Pathologies et techniques
de réparation des ouvrages
en béton armé*

I.1. Introduction

Le choix de la méthode de réparation et des matériaux à mettre en œuvre est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, en tenant compte des critères économiques des matériaux de construction, des conditions de chantier et des contraintes de site. Le principe de renforcement ou de réparation consiste en adjonction de matière dans les zones où les sections sont trop sollicitées. Une section devient trop sollicitée si, du fait même des dispositions adoptées ou du changement des conditions d'exploitations, les efforts appliqués sont supérieurs à ceux pris en compte dans les calculs (problème de renforcement), ou bien si la résistance a diminué par suite de dégradation (problème de la réparation). Il est possible de définir la maintenance comme l'ensemble des interventions qui ont pour but de prolonger la durée pendant laquelle l'ouvrage va procurer des avantages à la collectivité.

Parmi les interventions de maintenance, on peut distinguer :

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

Selon les cas étudiés, il est nécessaire de faire intervenir la notion de PROTECTION de l'ouvrage visant à assurer par exemple des fonctions d'étanchéité ou à limiter les phénomènes de corrosion, la notion de REPARATION visant à restituer les caractéristiques initiales de portance (rigidité – résistance) et éventuellement, la notion de RENFORCEMENT ayant pour objectif d'améliorer les performances de la structures vis-à-vis des conditions d'exploitation modifiées ou d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage. Différentes méthodes et techniques de renforcement des ouvrages sont couramment utilisées depuis de nombreuses années.

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

Les structures en béton armé sont soumises à des conditions environnementales difficiles ou amenées à recevoir des surcharges importantes.

Une étude des pathologies d'un ouvrage se décompose en plusieurs phases. Celle-ci commence par une visite de l'ouvrage accompagné d'un relevé détaillé des différentes pathologies présentes sur les ouvrages. Ensuite, on procède à un diagnostic afin de connaître

l'origine des pathologies pour préconiser d'une part le classement de l'état de l'ouvrage et d'autre part les travaux à réaliser.

En fait, les pathologies les plus fréquemment citées sont classées en trois types

- Pathologies dû à la dégradation des matériaux.
- Pathologies dû aux erreurs de conception ou de réalisation
- Pathologies dû à la modification des conditions d'exploitation des ouvrages en béton armé. [Chedad 2016]

I.2.1. Dégradation des matériaux :

Les deux principales composants de béton armé, l'acier et le béton, peuvent perdre ces Caractéristiques physiques et en particulièrement mécaniques sous l'effet des conditions environnementales définies par la localisation géographique de l'ouvrage.

Les principales causes de vieillissement sont liées aux phénomènes suivants [Hamelin 2002] :

🚧 Erosion, abrasion, chocs :

Les ouvrages sujets à l'érosion se situent essentiellement en milieu fluvial et maritime. Ils sont soumis au charriage d'éléments solides induits par les courants, à l'action des vagues à chaque marée. La dégradation du béton par frottement se traduit par la création de défauts géométriques de surface, l'apparition d'épaufrure et par des éclatements superficiels qui entraînent la mise à nu des armatures et l'accélération des risques de corrosion.

🚧 Action descycles de gel-dégel :

Selon le taux de porosité et de perméabilité des bétons, l'eau peut s'infiltrer et, sous l'action du gel, gonfler, générer des contraintes internes et créer des fissures [Ferrier 1999]. La dégradation par gel-dégel du béton est amplifiée par les chocs thermiques causés par l'apport de chaleur dû à la fusion de la glace.

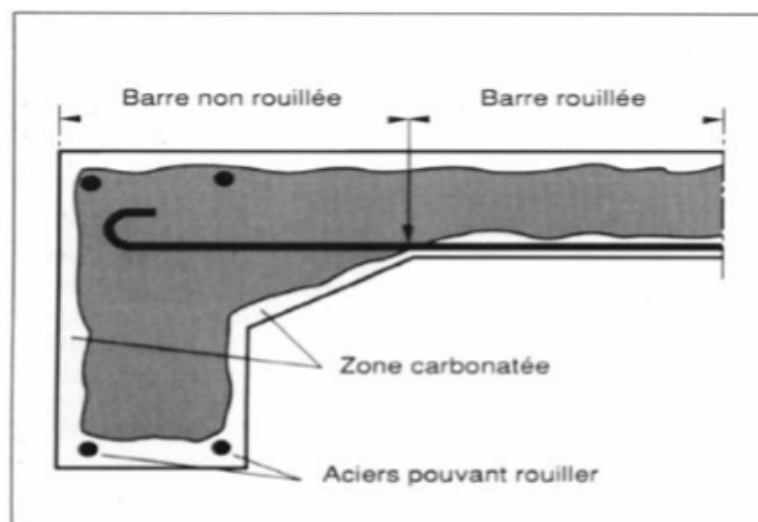


Figure I.1 : Dégradation d'un ouvrage soumis au gel dégel [Rabahi 2013]

La dégradation par gel-dégel est amplifiée par des chocs thermiques. En effet, la chaleur de fusion de la glace est de 80 cal/kg. Cette chaleur est empruntée au voisinage immédiat du lieu où se trouve la glace, cette couche se trouve alors soumise à une chute brutale de température qui passe en dessous de 0°C, et l'on aboutit à des sollicitations dans le béton de type choc thermique. L'une des méthodes les plus employées pour pallier les problèmes de gel-dégel est l'emploi, au moment de la mise en œuvre, d'adjuvant tels que des entraîneurs d'air. La principale fonction de ces entraîneurs d'air est de créer des vides permettant de compenser le gonflement du béton.

✚ Carbonatation et corrosion des aciers :

Il est important de retenir que le béton est un matériau basique et que, pour cette raison, il est vulnérable aux attaques acides et, plus particulièrement, à celles faisant intervenir des acides forts. La carbonatation est une réaction chimique entre la chaux du béton et le dioxyde de carbone de l'air qui a pour effet d'abaisser le PH de la phase interstitielle du béton. [Rabahi 2013].



(a) carbonatation d'une pièce de structure.



(b) Corrosion des armatures.

Figure I.2 : Carbonatation du béton et conséquences sur la structure [Rabahi 2013]

Les conséquences de cette réaction chimique sont très dommageables pour les armatures qui se trouvent à un PH où elles ne sont plus passivées et peuvent alors se corroder figure (I.2) [Vénuat 1989].

✚ Altération physico-chimique du béton :

L'eau et l'hygrométrie des conditions ambiantes sont à l'origine de différents mécanismes de dégradation du béton. L'eau, lors de sa percolation au sein du béton, dissout des constituants tels que la chaux et augmente la porosité du béton. Si, de plus, l'atmosphère est chargée d'anhydride sulfureux, le béton voit sa résistance mécanique diminuer et son niveau d'alcalinité chuter. Cette perte d'alcalinité peut aussi être induite par la carbonations du béton [Vénuat 1989].

Une autre cause de vieillissement du béton correspond aux mécanismes d'alcali réaction entre les granulats et le ciment [Mohamed 2004]. La formation de gels expansifs qui en résulte se traduit par un gonflement du béton et par le développement de fissures. Les pertes de performances du béton favorisent la corrosion des armatures sous l'action combinée de l'eau et des chlorures

✚ Réactions sulfatiques :

Les réactions sulfatiques sont provoquées par l'action des sulfates provenant du milieu extérieur (eaux souterraines, remblais contenant des sulfates, pluies acides), avec la chaux et les aluminates du ciment. Le produit final de la réaction est l'ettringite, dont le développement au sein du béton provoque une expansion qui altère les caractéristiques mécaniques du béton. La chaîne de réactions chimiques aboutissant à la formation d'ettringite est bien connue, car on connaît les équations chimiques qui décrivent l'oxydation des sulfures de fer, l'hydrolyse des sulfates ferreux, ainsi que l'attaque des différents constituants de la pâte de ciment par les ions sulfates. Cette chaîne est présentée dans les travaux de [Deloye1989].

✚ Alkali-réaction :

Les alcali-réactions sont des réactions chimiques entre certaines formes de silice ou de silicate contenus dans les granulats et les alcalins du béton. Les mécanismes de l'alcali-réactions sont complexes et font toujours l'objet de travaux de recherche. Les principales conséquences de cette réaction consistent en la formation d'un gel expansif, entraînant un gonflement du béton. Ce gonflement engendre à son tour des contraintes internes au sein de la structure. Il en résulte une expansion de la structure, ainsi qu'une création de fissures de différentes formes figure (I.3). Outre le gonflement et la fissuration, l'alcali-réaction a pour conséquence de diminuer les propriétés mécaniques du béton. Le phénomène d'alcali-réaction et ses conséquences sur le béton est traité en détail dans les travaux de [Mohamed 2004].



Figure I.3 : Entrée d'un tunnel, Fissurations grossières dues à l'alcali-réaction [Rabahi 2013]

Retrait du béton :

L'élimination de la quantité d'eau en excédent dans la formulation d'un béton pour assurer des conditions d'ouvrabilité acceptables se traduit par des variations dimensionnelles du béton. Le retrait, gêné par la présence d'armatures, a tendance à solliciter le béton en traction dès son plus jeune âge et, par conséquent, à créer des fissures

Les chocs :

Les désordres induits par l'exploitation d'un ouvrage constituent une cause non négligeable de dégradation du béton. Il s'agit le plus souvent d'action accidentelle de type mécanique qui se concrétise par des chocs [Calgaro.J 1997]. Les chocs les plus fréquents sont ceux des poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts, les chocs de bateaux ou d'objets flottants contre les piles en rivière figure (I.4). Ces chocs peuvent créer des épaufrures, des éclats important de béton, voir même des ruptures d'acier.



Figure I.4 : Choc sur une pile de pont [Rabahi 2013].

✚ Corrosion des armatures métalliques :

Les différentes causes de fissuration des bétons décrites préalablement limitent la protection des armatures et favorisent la dégradation des aciers passifs ou des câbles de précontrainte en diminuant l'alcalinité du béton et en favorisant l'action des chlorures. Le gonflement des armatures, par formation de rouille, qui en résulte, a tendance à accélérer les mécanismes de fissuration du béton. [Chedad 2016]

✚ Délamination :

L'action conjuguée des sollicitations climatiques, des sels anti-verglas et du trafic circulant directement sur le béton des hourdis de ponts a provoqué des délaminations du béton sur un nombre considérable d'ouvrages d'art. Dans les cas les plus graves, cette pathologie aboutit à la chute de plaque de béton et à la création de trous dans les tabliers de ponts figure (I.5). D'autres types de pathologie peuvent être rencontrés dans les ouvrages en béton tel que celles dues aux erreurs de conception ou encore les erreurs d'exécution qui peuvent intervenir dès la fabrication du béton et se poursuivre jusqu'à la mise en service finale de l'ouvrage. [Rabahi 2013]

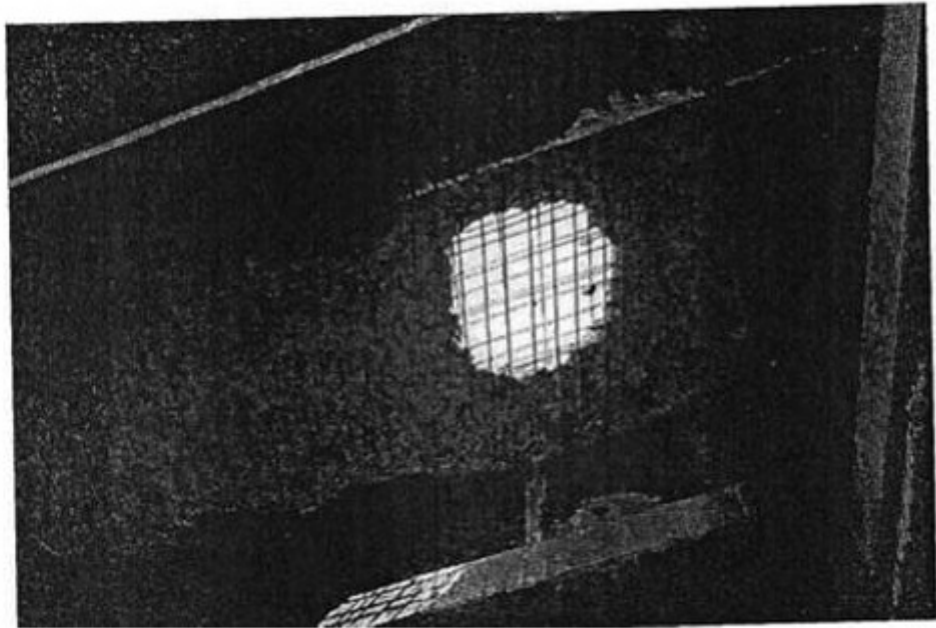


Figure I.5 : Délamination du béton d'un hourdis de pont aboutissant à la formation d'un trou. [Rabahi 2013]

✚ Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution:

Ce type de désordres peut être induit par des erreurs intervenant soit au stade du dimensionnement de l'ouvrage, soit au stade de son exécution.

Dans le premier cas, les causes de fissuration et de dégradation de la structure sont généralement induites par de graves erreurs dans :

- la vérification de la stabilité de l'ouvrage et des conditions de résistance ou, plus simplement, par la prise en considération d'hypothèses erronées au niveau des conditions de chargement, d'environnement, de fonctionnement de l'ouvrage.

Ces erreurs sont à l'origine, généralement, d'un mauvais dimensionnement des sections et d'une disposition non satisfaisante des armatures qui se traduisent par des localisations de fissures ou des ruptures non acceptables.

- une évaluation imparfaite des conditions de sollicitations cycliques des ouvrages et des lois de comportement en fatigue des matériaux est susceptible de remettre en cause les résultats de calcul et le dimensionnement pour une durée de vie escomptée.

Nous pouvons citer, plus particulièrement, l'incidence d'une mauvaise identification des lois de comportement des armatures passives ou actives, des bétons, sous des actions

combinées (fatigue, corrosion) sur la stabilité des ouvrages et sur l'apparition de zone d'endommagement.

Dans le deuxième cas, Les erreurs d'exécution qui sont susceptible de justifier une intervention au niveau de l'ouvrage portent sur la mauvaise formulation du béton engendrant une porosité trop élevée, les imperfections de coffrage (trop minces, déformables), les défauts de bétonnage, les incohérences du ferrailage (manque de recouvrement, l'insuffisance d'enrobage, absence d'armature de peau) ou sur les conditions non satisfaisantes de décoffrage, de transport et de manutention. [Chedad 2016]

Modification des conditions d'exploitation des ouvrages :

En fonction de l'évolution du trafic, ou de la voirie, il est possible de justifier la nécessité de renforcer ou d'améliorer la portance d'un ouvrage.

L'évolution des conditions de chargement est souvent induite soit par la modification des charges réglementaires sur essieux, soit par une modification de la fréquence des sollicitations qui s'exercent ou une sous-évaluation des charges d'exploitation.

Il faut aussi évoquer la nécessité, dans certains cas, de prendre en considération des sollicitations extrêmes (climatiques ou accidentelles). C'est notamment le cas de la mise en conformité des ponts ou bâtiment vis-à-vis des sollicitations sismiques où un séisme, même léger, peut être la source de désordre importants ou le renforcement de certains éléments de l'ossature (piles de ponts, poutres latérales) vis-à-vis de sollicitations accidentelles (chocs) telles que l'impact de véhicules [Lalgro 1997]. Notons que des tassements différentiels des fondations peuvent entraîner des fissurations.

I.3. Méthodes et techniques de renforcement :

Il est possible de définir la maintenance comme l'ensemble des interventions qui ont pour but de prolonger la durée pendant laquelle l'ouvrage va procurer des avantages à la collectivité [Llanoos 1997].

Parmi les interventions de maintenance, on peut distinguer :

- Les interventions qui visent à maintenir l'ouvrage à l'état neuf : ce sont les interventions d'entretien qui ont un caractère préventif.

- Les interventions qui améliorent l'état de l'ouvrage lorsque le processus de dégradation a déjà commencé : il s'agit des interventions de réparation et/ou de renforcement.

Selon les cas étudiés, il est nécessaire de faire intervenir la notion de PROTECTION de l'ouvrage visant à assurer par exemple des fonctions d'étanchéité ou à limiter les phénomènes de corrosion, la notion de REPARATION visant à restituer les caractéristiques initiales de portance (rigidité – résistance) et éventuellement, la notion de RENFORCEMENT ayant pour objectif d'améliorer les performances de la structures vis-à-vis de conditions d'exploitation modifiées ou d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage. Différentes méthodes et techniques de renforcement des ouvrages sont couramment utilisées depuis de nombreuses années. [**Chedad 2016**]

1.3.1. Méthodes de réparation non structurales :

L'existence de fissures au niveau d'un élément structural peut entraîner des désordres grave s'ils ont sous-estimé, qui peut atteindre une perte de portance ou bien un dysfonctionnement qui influe sur l'ensemble de la structure, la distribution déséquilibré des efforts contribuent à la dégradation du béton et l'apparition des armatures de ferrailages, donc un contact direct des armatures avec l'atmosphère provoquant sa corrosion, et là on est dans un état avancé de gravité, donc les méthodes de reprise de ce béton dégradé doivent être appliquées si l'on veut éviter d'avoir recours dans l'avenir à des techniques de réparation et/ou de renforcement plus onéreuses et parfois plus délicates à mettre en œuvre. Et dans le cas d'utilisation de méthodes plus lourdes, ces méthodes légères seront utilisées afin de restaurer un bon état de surface.

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

- préparation de la surface de béton à réparer,
- traitement des armatures éventuellement exposées,
- mise en œuvre d'un ou de plusieurs matériaux d'apport, - protection du parement ainsi réparé. [**Chedad 2016**]

1.3.1.1. Préparation de la surface de béton :

L'objectif d'une bonne préparation de surface est de créer un support sain, propre et rugueux afin d'assurer une bonne adhérence au niveau de la surface reprise.

Il est indispensable par conséquent d'enlever toutes les parties de béton non adhérentes au support. Dans des désordres consécutifs à la corrosion des armatures, il faut également effectuer un dégagement complet avec mise à nu de l'armature afin d'éliminer des zones de béton apparemment saines mais qui peuvent être polluées par des chlorures ou atteintes de carbonatation. Différents techniques existent pour éliminer le béton dégradé. Les plus classiques sont le sablage (à sec ou humide) ainsi que le décapage à l'eau à très haute pression, permettent d'obtenir d'excellents supports. La surface est ensuite nettoyée (en général par un lavage à l'eau sous pression) puis débarrassée des excédents d'eau, la plupart des produits de réparation s'appliquant sur une surface humide mais non ruisselante.

L'humidification de la surface facilite en effet l'accrochage des produits de réparation à base de liant hydraulique. [Chedad 2016]

1.3.1.2. Protection des aciers :

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

1.3.1.3. Réparation du béton dégradé par apports de matériaux :

1.3.1.3.1. Ragréage:

Les produits de ragréages peuvent être classés en trois catégories : des produits à base de liants hydrauliques, des produits à base de résines de synthèse et des produits mixtes à base de ciment et de polymère organique réactif. Le choix du produit est fonction de l'objectif de la réparation et dépend de nombreux paramètres comme les caractéristiques mécaniques et physico-chimiques des produits. [Chedad 2016]

1.3.1.3.2. Traitement des fissures :

Les traitements sont alors effectués en surface pour rétablir l'étanchéité ou en masse pour reconstituer le monolithisme de la structure en assurant un remplissage complet de la fissure. Le matériau introduit est de caractéristiques élevées et doit être adhérent afin de redonner à la structure sa capacité de fonctionnement initiale, la technique utilisée est celle de l'injection. [Chedad 2016]

I.4.1. Méthodes de réparation structurale :

Les réparations et/ou renforcement structuraux des ouvrages en béton armé peuvent être effectués soit par ajout de forces (cas de la précontrainte additionnelle) [Godart.B 1997], soit par ajout de matière (béton projeté, adjonction d'armature complémentaire et renfort collés (plaques d'acier ou composites)).

1.4.1.1. Réparation par béton projeté :

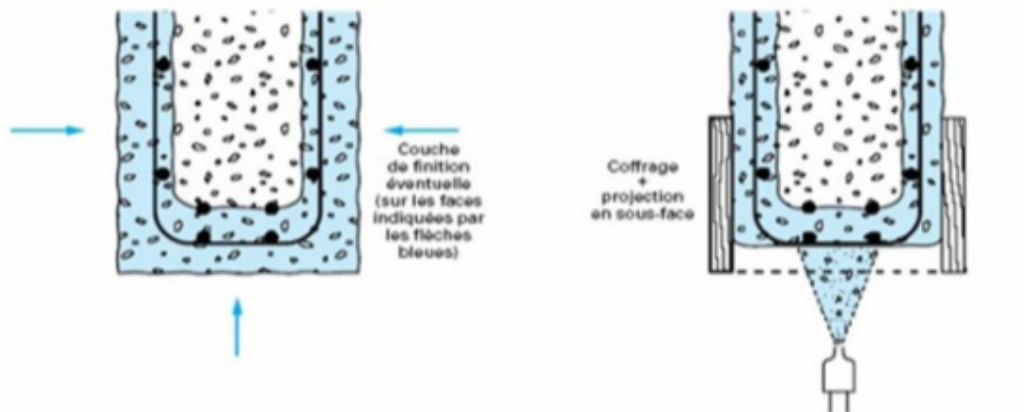


Figure I.6: Réparation de poutre par béton projeté. [Chedad 2016]

Cette technique, très au point, utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défaillantes que pour la réparation d'ouvrage endommagés, exige pour sa mise en œuvre un personnel spécialisé. Le béton peut être, ou non, combiné avec l'adjonction d'armatures complémentaires. Après durcissement, le béton projeté possède les propriétés d'un béton coulé, puis vibré [Resse.c 1981]. La projection est possible dans toutes les directions, en particulier en plafond figure(I.1).

Les travaux de réparation par béton projeté se regroupent en deux catégories : les réparations superficielles et les réparations profondes.

Grâce à son adhérence au support, à ses caractéristiques très proches de celle du béton coffré, aux possibilités de mise en place et d'enrobage d'armatures de renfort qu'il procure, le béton projeté permet de réaliser économiquement de telles réparations.

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

1.4.1.2. Réparation par adjonction d'armature complémentaire :

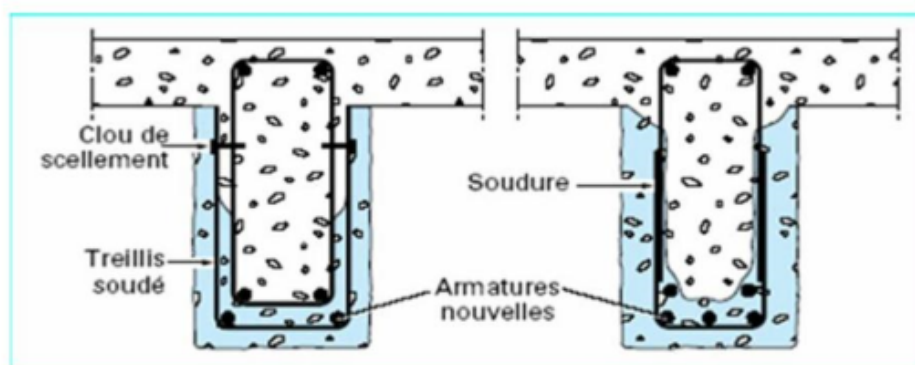


Figure I.7: Réparation de poutre par adjonction d'armature [Chedad 2016]

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupés accidentellement ou lorsqu'il s'agit de renforcer une structure. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance des sections renforcées. La protection de ces armatures est assurée par un béton coulé ou projeté et leurs jonctions avec les armatures existantes peuvent se faire par des procédés classiques (recouvrement, soudure, manchonnage) figure(I.7). [Ait Ameer Meziane 2008]

1.4.1.3. Réparation par précontrainte additionnelle :

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

particulièrement adaptée au renforcement en flexion et vis-à-vis de l'effort tranchant par l'emploi d'étriers actifs figure(I.8). [Chedad 2016]

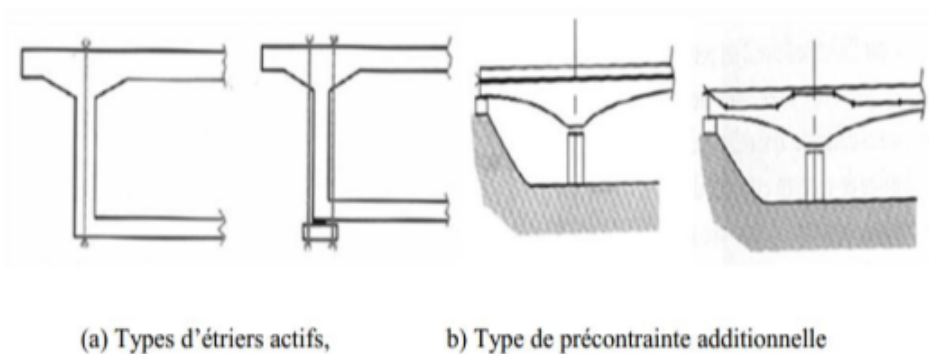


Figure I.8 : Différents types de réparation par précontrainte additionnelle. [Chedad 2016]

Cette méthode de renforcement bien que très efficace présente quelques difficultés de mise en œuvre [Cussin 1992]. En effet, elle nécessite de dimensionner soigneusement les ancrages et de déterminer le chemin approprié des câbles. Ainsi des forages à travers certaines parties de la structure existante sont nécessaires. Ces forages doivent être exécutés sans toucher aux différentes armatures existantes. Enfin il faut s'assurer que la précontrainte additionnelle se répartisse dans la structure et surtout dans les zones fissurées.

1.4.1.4. Renforcement par collage de plats métalliques :

Le renforcement de structure par plats métalliques, mieux connue sous le nom de procédé l'Hermite, consiste à coller des plats en acier sur les faces tendues de structures en béton armé. Ainsi, L'Hermite [Hermite R.L 1967] s'est intéressé, dès le début des années soixante, à l'utilisation de ces composés adhésifs de type époxy polymérisant à froid pour associer béton et acier.

Selon, trois problèmes mécaniques se posent lors de l'utilisation de tôles extérieures collées au béton pour le renforcement des structures :

- La mise en flexion locale de la tôle au voisinage des fissures qu'elle recouvre,
- La répartition des efforts repris par les tôles dans le cas d'utilisation d'empilement,
- La répartition des déformations entre les aciers internes au béton et les aciers collés extérieurement. [Theillout 1997]

L'acier de renfort est constitué dans la plupart des cas de tôle d'acier de nuance E24, d'épaisseur de 3 à 5 mm pour que l'adhérence entre l'acier et la colle ait une bonne tenue, les tôles utilisées doivent subir toute leur préparation en usine (découpage, sablage...).

La mise en place des tôles nécessite une très bonne préparation de chantier ainsi qu'une excellente coordination des équipes. Le collage impose un dispositif de serrage pouvant être un étaielement, un serrage par serre-joint ou un serrage par vérins plats. L'emploi de ce mode de réparation est particulièrement limité à cause de sa mise en œuvre difficile et onéreuse.

Ce procédé consiste en un apport d'armatures extérieures soit pour consolider un élément dont les dégradations mettent en péril la résistance, soit pour remplacer des aciers oubliés, ou mal positionnés. La préparation des surfaces, la mise en œuvre des colles, la réalisation du placage, etc., doivent impérativement être confiées à des entreprises spécialisées ou à des laboratoires du fait de la difficulté de la mise en œuvre de cette technique, certains procédés font d'ailleurs l'objet de brevets (ex. : brevet UTI-L'HERMITE, inventeur de la technique), figure (I.9).

La colle utilisée est, généralement, une résine époxyde. Son épaisseur est de 0,5 à 1 mm.

Les tôles d'acier, de qualité courante, ont une épaisseur limitée à 3 mm [Luyckx J 1999].

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

Sensibilité de l'acier à l'oxydation (il demande donc une protection et un entretien quotidien) ;

Impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles, même sous faible épaisseur ;

Nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine ;

Impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masse manipulées trop importantes), ce qui limite d'autant les possibilités de réparation.



Figure I.9: Renforcement d'un viaduc par tôles collées. [Chedad 2016]

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

I.5.1. Utilisation des composites dans le génie civil :

Les matériaux composites sont utilisés dans le domaine de l'aérospatiale, des transports aériens et terrestres, mais également dans la fabrication d'article de sport, leur utilisation en génie civil est pour l'instant moins développée. L'utilisation des renforts textiles, au sein de composites mettant en œuvre de matrices souples (thermoplastiques) est bien connue dans la construction, sous la forme d'éléments de couverture métal- textiles notamment.

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

La réhabilitation de structures existantes par FRP est une autre possibilité d'utilisation de ces matériaux dans le génie civil. Aujourd'hui, la recherche s'intensifie dans ce domaine et les applications de ces matériaux dans le génie civil se diversifient. [Chedad 2016]

I.5.2. Remplacement des tôles métalliques par des matériaux composites à fibres de Carbone :

Dans le domaine du génie civil, une phase de consolidation a succédé à la période 1960-1990. La construction en masse d'ouvrages d'art, de grands immeubles et d'installations industrielles, a laissé place à des opérations de maintenance qui, souvent, se traduisent par la nécessité de renforcement des structures [Khelifa Z 2009]. Qu'il s'agisse de réparations à la

suite de désordres ou de simple mise en conformité avec des codes de plus en plus exigeants, nombreux sont les exemples de telles opérations. Jusqu'à présent, parmi les types de renforcements utilisés, le collage extérieur de plaques métalliques, selon le procédé L'Hermitte est l'un des plus répandus dans le monde en raison des avantages qu'il présente :

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

Toutefois, le collage de tôles métalliques présente aussi quelques difficultés telles que la sensibilité de l'acier à l'oxydation et des difficultés pendant la mise en œuvre.

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

La réparation par tôle n'est certainement pas à proscrire et dans de nombreux cas il n'est pas nécessaire de la remettre en question, puisqu'elle a largement fait ses preuves. Il est cependant intéressant de proposer une alternative dans le cas où des conditions environnementales difficiles ou bien des difficultés de mise en œuvre risquent de compromettre l'efficacité de la technique. [Chedad 2016]

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

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



Figure I.10 : Mise en œuvre d'une réparation par stratification [Chedad 2016]

Les matériaux composites présentent des avantages indéniables (caractéristiques mécaniques, poids, durabilité vis-à-vis des agressions chimiques) qui justifient pleinement leur utilisation pour la réhabilitation des ouvrages du génie civil. De plus, la grande expérience dans le domaine du collage structural dont bénéficient les acteurs de la réparation

par plats métalliques colées doit permettre d'utiliser les matériaux composites avec d'autant plus de facilité. Aujourd'hui, la recherche s'intensifie dans ce domaine, et les applications de ces matériaux dans le génie civil se diversifient.

La figure (I.11) présente différentes configurations de collage de matériaux composites sur une poutre, chaque configuration est prévue pour un objectif particulier et la figure I.7 montre le renforcement de structures au moyen de composites préfabriqués Sika® CarboDur® [Perrier R et Hamelin P 1996].

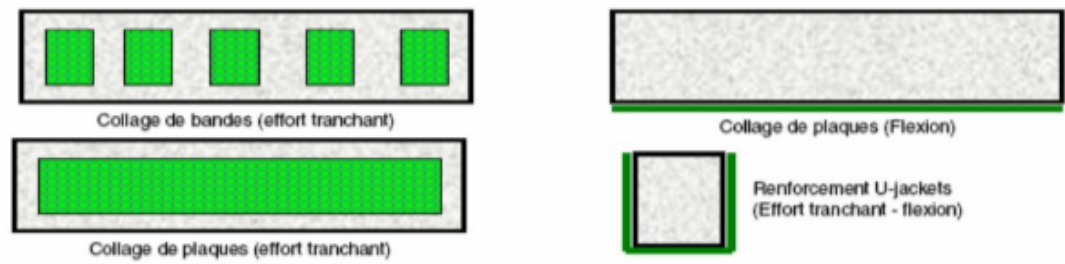


Figure I.11 : Différentes méthodes de renforcement par le collage [Chedad 2016]

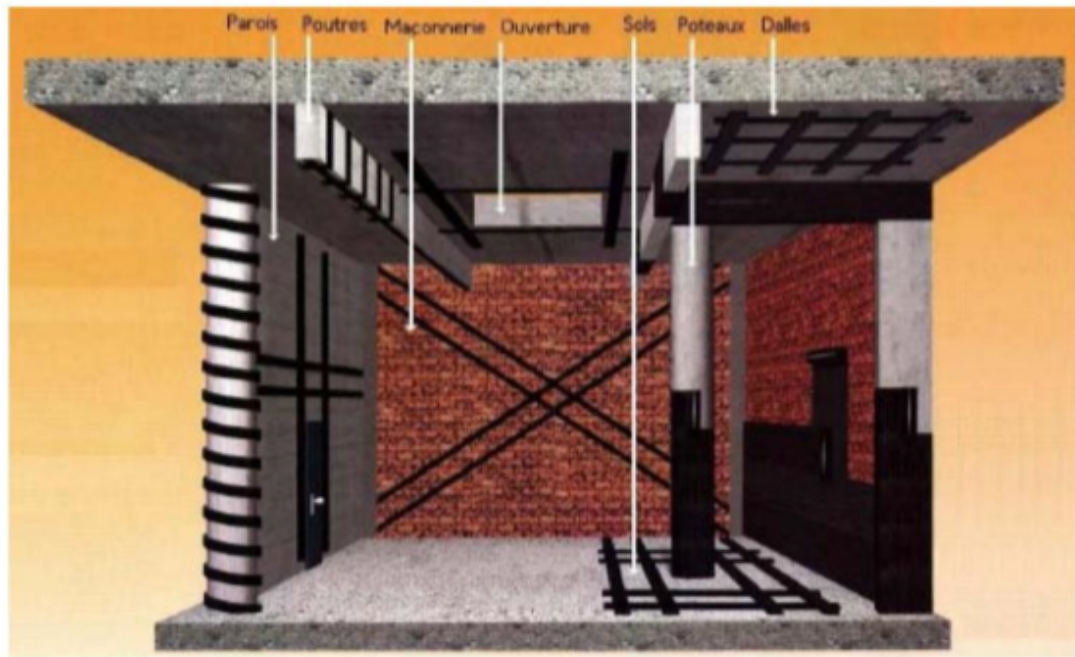


Figure I.12 : le renforcement de structures au moyen de composites préfabriqués [Rabahi 2013]

I.6. Conclusion :

La fissuration est le symptôme le plus fréquent des ouvrages en béton armé mais la seule observation visuelle des fissures rend difficile le diagnostic. Indépendamment de l'observation de la fissuration, reflet de la dégradation, la question essentielle qui se pose est de savoir à partir de quand la dégradation a une influence sur le comportement mécanique de la structure. Cela revient à se demander à quel moment une réparation doit être envisagée et quelle sera son ampleur. En effet, si une fissure est constatée, son rôle mécanique n'est pas toujours évident, un important motif de fissuration ne signifiant pas forcément que la capacité portante est affecté. Mais une fissure peut menacer la durée de vie de l'ouvrage dès qu'elle entame l'étanchéité de celui-ci. C'est pour cette raison que des méthodes de réparation non structurales sont indispensables, elles sont employées lors de désordres mineurs. Les enjeux économiques ont été à l'origine de la prise de conscience de l'importance de la maintenance et, ainsi, au développement des techniques de réhabilitation. Les techniques traditionnelles ont montré leurs limites au comportement à long terme (oxydation des tôles d'acier, durabilité du béton projeté, etc.). En même temps, la rentabilité d'une opération de maintenance est conditionnée par sa durabilité, et donc, par la baisse des fréquences d'intervention. La recherche dans le domaine de réhabilitation s'est orientée vers l'utilisation de nouveaux matériaux capables de répondre aux différents critères exigés par les opérations de la maintenance des ouvrages.

Χηαπιτρε ΙΙ□:

*Généralités sur les
matériaux FGM*

II.1.Introduction :

Les matériaux à gradients évalués FGM représentent un des récentes développements, la révolution et la conception de ces matériaux a été défini au 21ème siècle. Ils sont utilisés pour leur grande résistance mécanique et thermique. Afin d'améliorer les caractéristiques des pièces structurelles on doit chercher au sein d'un même matériau, des propriétés différentes, mais ce différence pose un nouveau problème qui est le délaminage c'est-à-dire une concentration des contraintes inter-laminaires en causant le décollement des matériaux. Pour résoudre ce problème on utilise les matériaux à gradients évalués FGM, qui sont des matériaux composites produits en changeant sans interruption les fractions de volume dans la direction d'épaisseur pour obtenir un profil bien déterminé. Ces types de matériaux, ont suscité beaucoup d'attention récemment en raison de leurs capacités à diminuer la disparité dans les propriétés matérielles et de réduire les contraintes thermiques.

Les FGM ont été conçus en tant que matériaux de barrière dans les applications de haute technologique : aéronautique, aérospatiale, nucléaire, semi-conducteurs, et en génie civil et trouve également des applications biomédicales. Le présent chapitre a pour but d'illustrer le concept des matériaux à gradient de propriétés, et de déterminer leurs caractéristiques ensuite les différentes techniques de production.

II.2. Le concept d'un matériau à gradient de propriétés :

Les matériaux constituant les parois des engins spatiaux (navettes spatiales ou des avions hypersoniques) sont soumis à des températures élevées. Les pièces les plus exposées sont le cône d'entrée, les bords d'attaque des ailes ainsi que certaines surfaces inférieures. Pour cette raison les matériaux des parois, soumis sur une face à environ 1800°C en atmosphère, doivent supporter dans leur épaisseur d'une dizaine de millimètres, un gradient thermique d'environ 1300°C. Il n'y a aucun matériau monolithique capable de résister à une telle contrainte thermique [Koizumi M].

La solution envisagée est la mise en œuvre de matériaux composites et notamment l'utilisation des matériaux à gradients évalués. On peut imaginer un matériau dont la face exposée à très haute température posséderait des propriétés de résistance aux fortes chaleurs et à l'oxydation, tel que la céramique, et dont la face inférieure serait très bonne conductrice de la chaleur et posséderait une bonne résistance mécanique et une meilleure ténacité, comme le métal.

Cependant, si l'on considère un simple assemblage de ces deux matériaux, ils présentent immédiatement une rupture due aux contraintes thermiques exercées à l'interface entre les deux types de matériaux ayant des propriétés thermiques différentes. L'idéal serait de supprimer cette interface en créant une transition continue entre les deux faces.

C'est ainsi qu'est né le concept de matériau à gradient évalué dans les années 1980 par un groupe de chercheurs au laboratoire national d'aérospatial (National Aerospace Laboratory, STA) au Japon.

Le FGM consiste en l'association de deux matériaux aux propriétés structurales et fonctionnelles différentes avec une transition idéalement continue de la composition de la structure et de la distribution des porosités entre ces matériaux.

Généralement, les FGM sont des matériaux constitués de plusieurs matériaux à des caractéristiques mécaniques contenant des composantes différentes tels que les céramiques et les métaux. Les vides sont également considérés comme une composante des matériaux FGM. Ils [K. Kokini., Y. Takeuchi] sont donc des composites présentant des caractéristiques macroscopiquement non homogènes.

La plupart des FGM sont constitués des céramiques et des métaux dont les propriétés mécaniques sont comparés dans le tableau II.1.

Le changement continu dans la composition est donc dans la microstructure d'un matériau FGM est illustré dans la figure II.1, il en résulte un gradient qui détermine les propriétés des FGM.

Tableau II.1 : Comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal [K. Kokini., Y. Takeuchi].

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 « couches intermédiaires »	Céramique-métal	-élimination des problèmes de l'interface ; -relaxer les contraintes thermiques.
La face à basse température	Métal	-bonne résistance mécanique ; -conductivité thermique élevée ; -très bonne ténacité.

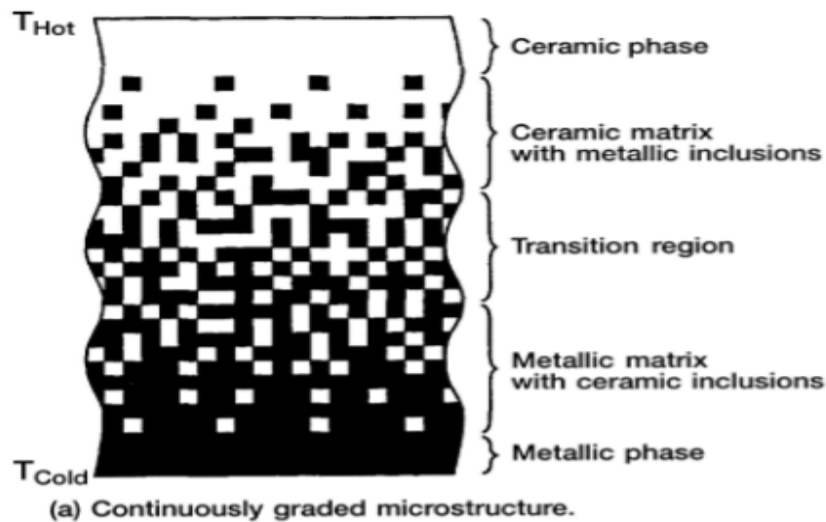


Figure II.1 : La variation de la composition d'un FGM [Chedad 2016]

La figure II.2 montre les concentrations de contraintes dans les barrières thermiques au niveau des interfaces (changement brutale de composition). Qui indique aussi comment un FGM peut alléger ces concentrations de contraintes en changeant graduellement les propriétés matérielles et assure toujours la protection thermique.

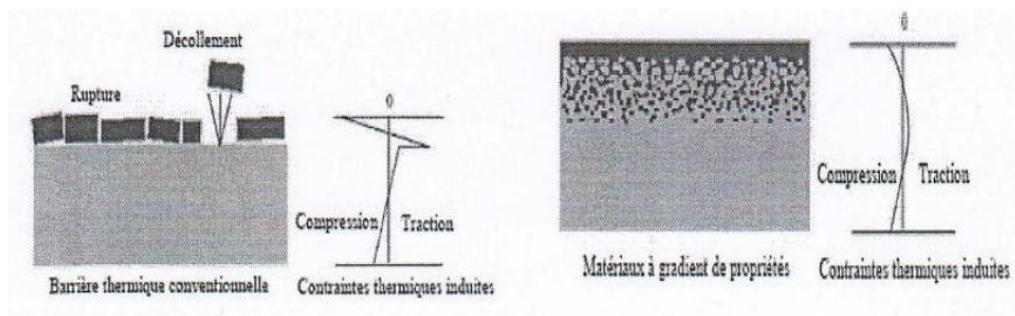


Figure II.2 : Protection thermique des FGM [Chedad 2016]

II.3. Domaines d'application des FGM :

Le concept des matériaux à gradient évalués FGM est applicable dans des nombreux et larges intervalles de domaines tels que les matériaux de construction, matériaux de conversion d'énergie, aéronautique, aérospatiale, nucléaire et semi-conducteurs. Ainsi, ces matériaux ont deux propriétés contradictoires : la conductivité thermique et l'isolation thermique. [Chedad 2016]

Actuellement, ils permettent la production des matériaux légers, résistants et durables.

Les principaux domaines d'application des FGM sont :

- Génie civil : ponts à poutre en caisson, les cheminées, les fondations élastiques (ces structures de plaques peuvent être trouvées dans différents types d'applications industrielles telles que radiers), réservoirs de stockage, les piscines.
- Aéronautique : composants de moteur-fusée, corps des avions spatiaux.
- Chimique : l'échangeur de chaleur, tube de chaleur, récipient de réaction
- Ingénierie : outils de coupe, éléments de moteur.
- L'énergie nucléaire : composante des réacteurs nucléaires, pastilles de combustible.
- Électronique : semi-conducteur à bande graduée, capteurs.
- Optique : fibres optiques, lentilles.
- Conversion d'énergie : générateur thermoélectrique, convertisseur thermoïonique, pile à combustible.
- Matières biologiques : implants, peau artificielle,
- Produits en générale : matériaux de constructions, corps de voiture, verres de fenêtre.

II.4. Comparaison entre les matériaux type FGM et les matériaux composites traditionnels :

Généralement, les FGM sont des matériaux constitués de plusieurs matériaux contenant des composants différents tels que les céramiques et les métaux. Ils sont donc des composites présentant des caractéristiques macroscopiquement non homogènes. Le changement continu dans la composition est donc dans la microstructure du matériau distingue les FGM des matériaux composites conventionnels comme illustré sur la figure II.3 [Koizumi M]. Il en résulte un gradient qui déterminera les propriétés matérielles des FGM. Dans certains cas, on peut avoir un FGM constitué d'un même matériau mais de microstructure différente [Boch. P Chartier. Huttepain. M].

Propriétés	<p>1 Résistance mécanique</p> <p>2 Conductivité thermique</p>		
Structure	<p>Eléments constitutifs:</p> <p>céramique ○</p> <p>métal ●</p> <p>microporosité ◊</p> <p>fibre ✱</p>		
Matériaux	exemple	FGM	NON-FGM

Figure II.3 : Caractéristiques des matériaux composites FGM en comparaison avec les matériaux composites conventionnels [Chedad 2016]

[Yoshihisa Uchida,] à établie un modèle simple illustrant les différences entre les matériaux à gradient évalué FGM et les matériaux composés conventionnels (figure II.4). Le matériau plan composé à une caractéristique plane, et le matériau relié à une frontière sur l’interface de deux matériaux. Les FGM ont d’excellentes caractéristiques qui diffèrent les matériaux plans composés et reliés. Par conséquent, les FGM attirent l’attention en termes de leur application dans les domaines industriels. Puisque les FGM ont une double propriété des deux matières premières qui sont mélangées ensemble, et la distribution des composantes est graduée sans interruption, par exemple, l’un des FGM qui est composé du métal et de la céramique réuni les caractéristiques de la bonne résistance thermique et mécanique.

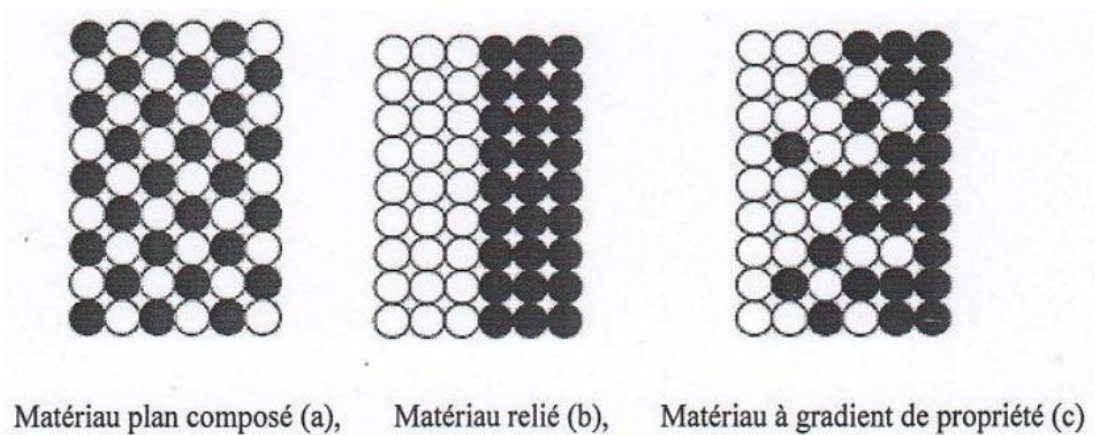


Figure II.4 : La distribution composante des matériaux [Chedad 2016]

II.5. Méthodes de fabrication de FGM :

Il existe de nombreuses méthodes d’élaboration des matériaux à gradient de propriétés, les techniques les plus employées sont les suivantes :

II.5.1. Coulage en Bande (Tape Casting ou Doctor-Blade) :

Le coulage en bande consiste à couler une barbotine de poudres fines en suspension aqueuse ou non-aqueuse (la plupart des travaux commerciaux utilisent le procédé non-aqueux) sur un support plan en couches minces et régulières. Selon les cas, c'est soit la lame (doctor blade) qui est animée d'un mouvement de translation, soit le support qui se déplace sous la lame (fig. II.5). Les produits obtenus sont des feuillets avec des épaisseurs contrôlées (25-1000 μm). Après un raffermissement de la pâte, les feuillets sont démoulés et ensuite découpés. [Chedad 2016]

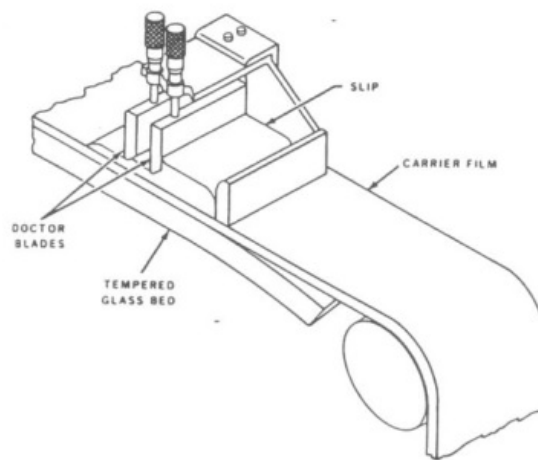


Figure II.5 : Principe de la méthode coulage en bande [Chedad 2016]

Le solvant doit avoir un point d'ébullition très bas et une viscosité faible. Il doit être soluble avec le liant, le plastifiant et les autres ajouts mais ne doit être ni soluble ni réactif avec la poudre céramique. Le liant donne une grande résistance mécanique au produit cru en permettant son maniement. Généralement un plastifiant est ajouté au liant pour baisser sa viscosité. Le liant, le plastifiant et le défloculant doivent être totalement dégagés pendant le déliantage.

L'un des plus anciens travaux sur l'étude de cette technique a été publié par Howatt et al. En 1947 voir [Williams, J.C.], et depuis d'autres travaux ont été réalisés [Boch. P Chartier. Huttepain. M.] , [P. Boch., T. Chartier., M. Huttepain], . Ce procédé est devenu une technique économique pour la production des substrats céramiques de type Al_2O_3 et surtout pour les condensateurs à base de BaTiO_3 .

On peut d'ailleurs remarquer qu'il s'agit déjà de F.G.M puisqu'il faut empiler des couches conductrices (métaux rares) avec des couches diélectriques (BaTiO_3 principalement).

Le procédé de coulage en bande est largement utilisé pour réaliser des matériaux composites laminaires suivant deux méthodes : soit par réalisation directe de bandes multicouches grâce à un système de lames multiples, c'est le cas des tri-couches élaborés par Mistler ; soit par empilage de couches élaborées séparément, dont la cohésion est ensuite assurée par une étape de thermo-compression [Boch. P Chartier. Huttepain. M.], [P. Boch., T. Chartier., M. Huttepain],

II.5.2. Coulage Séquentiel en Barbotine (Slip Casting) :

Basiquement, le coulage en barbotine (slip casting) consiste à couler une suspension dans un moule poreux qui va drainer le liquide grâce aux forces capillaires, laissant un tesson (couche de poudre compacte) sur la surface du moule. Après séchage, on obtient le corps en cru.

Donc le coulage se décompose en deux étapes essentielles :

- formation du tesson ou « prise » ;
- consolidation du tesson ou "raffermissement".

La filtration, c'est à dire la formation du tesson lors du coulage, peut être considéré comme un processus d'élimination d'une partie de l'eau de la barbotine ; Cette eau migre à travers la couche de tesson déjà formée, sous l'effet :

- Du pouvoir de succion du plâtre (coulage classique (J. S. Moya, A.J. Sanchez-Herencia., J. Requena., R.MORENO,))
- Ou d'une pression appliquée sur la barbotine (coulage sous pression).

Dans le cas de la fabrication de multicouches, après la formation du premier tesson, le dépôt de la deuxième couche s'effectue de manière telle que la barbotine ne pénètre pas dans le tesson formé. Ce procédé est successivement reproduit pour les autres couches.

II.5.3. Dépôt par Électrophorèse :

Un autre processus est ajouté aux différentes techniques de la fabrication des FGM, ce qu'on appelle le dépôt par électrophorèse (EPD) est un processus assez rapide à faible coût, capable de produire les matériaux à gradient de propriétés changeant sans interruption avec la géométrie complexe. EPD se compose de deux processus, c'est-à-dire le mouvement des particules chargées en suspension dans un champ électrique entre deux électrodes (électrophorèses) et le dépôt de particules sur l'un des électrodes [Aldo R. Boccaccini, O.

Vander Biest, Jan B]. EPD permet la conception des matériaux à gradient de propriétés en forme de plaque binaire en déposant d'une suspension de poudre à laquelle une deuxième suspension est sans interruption ajoutée pendant le processus. Le dépôt est un contrat de poudre emballé étroit qui a besoin de l'agglomération pour réaliser les composants matériels entièrement denses.

Dès lors, de nombreuses applications d'EPD ont été développées pour la fabrication de la céramique, y compris l'application des matériaux à gradients évalués peuvent être obtenus tels que la céramique-céramique ZrO_2/Al_2O_3 , et la céramique-métal, WC/Co . Une installation générale de ce principe est illustrée sur la figure II.6.

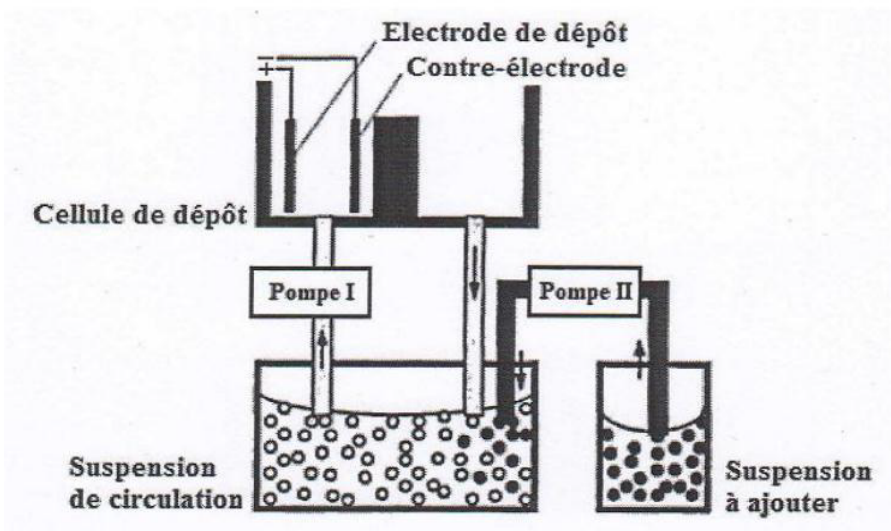


Figure II.6 : Vue schématique de l'installation d'EPD pour la production des matériaux.[Chedad 2016]

II.5.4. Compaction Sèche des Poudres :

Dans cette technique les poudres sont successivement versées dans un moule en acier. Chaque fois qu'une poudre est versée, une faible compression est exercée. Ensuite, la compaction de l'ensemble des couches sera effectuée. Ce procédé est suivi, généralement, par une pression isostatique et un déliantage. La densification sera enfin l'étape finale [A Bioshop., C. Y. Lin., M. Navaratnam., R.D Rawlings., H. B. McShane].

Ce procédé peut être envisagé pour la fabrication de pièces de formes complexes. En effet il s'applique aussi avec la technique du pressage isostatique, et de façon industrielle.

II.5.5. Projection Plasma :

La projection plasma consiste à introduire des particules solides (de taille inférieure à 100 μm , environ) dans un jet de gaz, dont la température atteint couramment 11000 $^{\circ}\text{C}$ et la vitesse 10001500 m/s. Le dépôt est ainsi formé par l'empilement des lamelles solidifiées obtenues par l'impact des particules sur le substrat préalablement préparé [Watremetz B]. Ce procédé est utilisé en particulier pour déposer des matériaux à haute température de fusion tels que des alliages réfractaires ou des céramiques. Les caractéristiques des dépôts réalisés par projection plasma sont la résistance à l'usure, à la corrosion ainsi que l'isolation thermique et électrique.

Une recherche détaillée a été effectuée sur la microstructure et le contrôle de propriété des fines particules pulvérisés par plasma. La projection par plasma est un processus rapide et fournit la formation de film sur une large zone, mais a habituellement un inconvénient avec sa microstructure approximative [Omori M., Kakita T., Okubo A., and Hirai T., J]. Ichikawa [Ichikawa K] a employé les poudres mécaniquement alliées des matériaux thermoélectriques, et a réussi à bien contrôler la teneur en dépôt dans le silicium (SiC) pour former un matériau thermoélectrique transporteur concentration-gradués avec une microstructure homogène. Sa configuration de pulvérisation est schématiquement montrée sur la figure II.7.

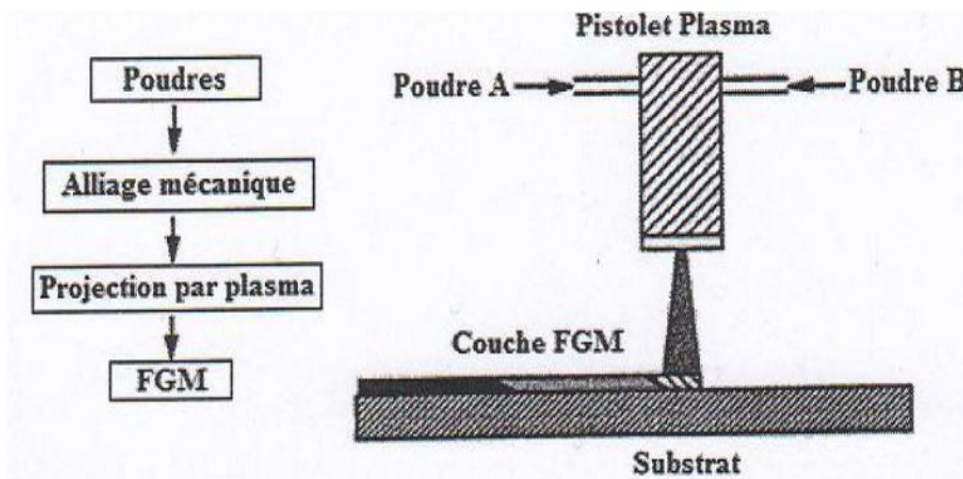


Figure II.7 : Projection par plasma pour former un matériau thermoélectrique gradué. (La composition est graduée dans la direction plane) [Chedad 2016]

II.5.6. Dépôt physique en phase vapeur (PVD):

La technique de dépôt physique en phase vapeur (Physical Vapor Deposition) est une technologie primordiale (prometteuse) pour la production de revêtements de barrière

thermique. Parmi les caractéristiques avantageuses de PVD est que les revêtements fabriqués ont des surfaces lisses, qui n'exigent pas la fermeture de trous de refroidissement. Toutefois, le principal avantage est leur résistance exceptionnelle aux chocs thermiques, ainsi que la durée de vie est considérablement plus longue. L'équipement utilisé pour déposer les revêtements d'isolation thermiques par l'intermédiaire de PVD, se compose de plusieurs récipients pour le chargement, le préchauffage, et le dépôt plus un dispositif de rotation et la manipulation des échantillons ...etc. [Miyamoto Y., Kaysser W.A., Rabin B.H., Kawasaki A., Ford R.G].

Une autre approche pour obtenir une structure à gradients est d'utiliser un mélange d'aluminium, l'alumine, et de zircone, chimiquement contrôlés peuvent être fabriqués facilement par vaporisation à partir de sources multiples en utilisant un ou plusieurs pistolets électroniques. En ajustant les paramètres de faisceau d'électrons, différents taux de dépôt peuvent être obtenus pour chaque source [Miyamoto Y., Kaysser W.A., Rabin B.H., Kawasaki A., Ford R.G]. Si les taux d'évaporation de deux composants, par exemple alumine et de zircone, sont changés sans interruption, un gradient défini de composition est obtenu, c'est le FGM. Pour les systèmes de barrières thermiques plus sollicités à l'environnement oxydant, notamment les aubes mobiles de turbines aéronautiques ou terrestres ne sont, toutefois, pas systématiquement élaborés par projection thermique, dans le cas de la zircone ZrO_2 , un autre procédé différent est également employé. En l'occurrence, il s'agit de la technique de l'évaporation sous faisceau d'électrons (EB-PVD) qui conduit à des microstructures et des propriétés thermomécaniques assez différentes de celles obtenues par la technique de la projection thermique [Mévrel R.].

II.5.7. Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) :

Dans la technique de dépôt chimique en phase vapeur (Chemical Vapor Deposition), représenté schématiquement sur la figure II.8, un dépôt est formé sur un substrat en soumettant la source des gaz (par exemple, des hydrures, bromures ou chlorures) qui occupent la chambre de réaction, à différents types d'énergie comme la chaleur, la lumière et le plasma [Miyamoto Y., Kaysser W.A., Rabin B.H., Kawasaki A., Ford R.G].

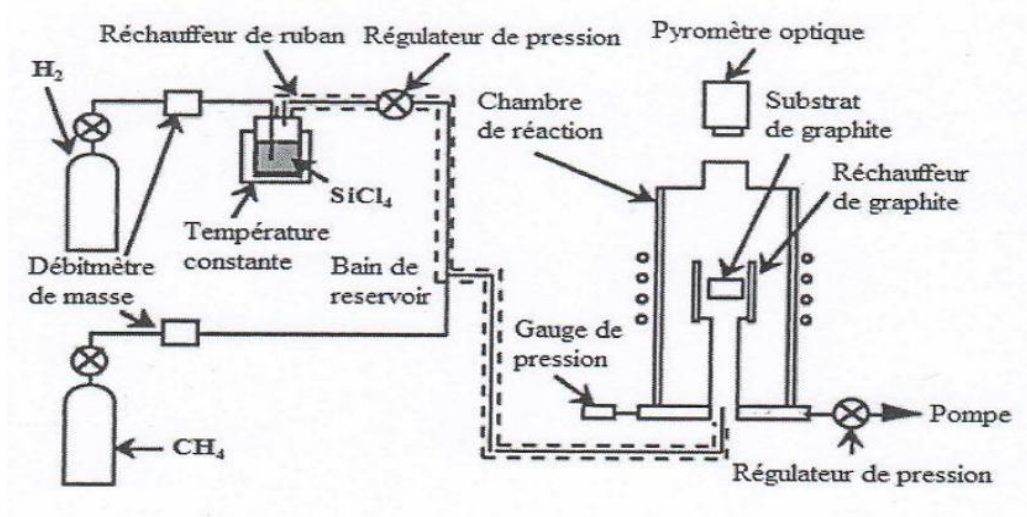


Figure II.8 : Schéma de l'installation pour la préparation d'un SiC/C FGM par le dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

Les FGM peuvent être synthétisés à lent pour modérer des taux de dépôt en modifiant le rapport de mélange de la source des gaz, ou par le contrôle de la température de dépôt, la pression de gaz, ou le débit de gaz. En raison de son faible taux de dépôt, CVD est largement utilisé pour l'infiltration de piles ou pour la fabrication de couches minces.

Un exemple typique d'une application de FGM par CVD est la formation d'un revêtement gradué de carbure de silicium SiC sur le graphite dans lequel il y a une transition continue de SiC au C. des compositions contrôlés la source de mélanges des gaz ($\text{CH}_4\text{-SiCl}_4\text{-H}_2$) sont employés aux températures de dépôt entre 1400 °C et 1500 °C et aux pressions entre 1.3 et 6.5 KPa.

II.6. Revue sur les différentes lois qui régissent la variation des propriétés matérielles suivant l'épaisseur d'une plaque FGM:

Considérant une plaque élastique rectangulaire (Figure II-9). Les coordonnées x et y définissent le plan de la plaque, tandis que l'axe z lancé sur la surface moyenne de la plaque est dans la direction de l'épaisseur.

Les propriétés matérielles, module de Young et le coefficient de Poisson, sur les surfaces supérieure et inférieure sont différent mais sont déterminés selon les demandes d'exécution. Cependant, le module de Young et le coefficient de Poisson des plaques changent sans interruption seulement dans la direction d'épaisseur (l'axe z) ($E=E(z)$, $\nu=\nu(z)$).

DELALE et ERDOGAN [F. Delale., F. Erdogan] ont indiqué que l'effet du coefficient de Poisson sur la déformation est beaucoup moins important que celui du module de Young. Donc, on suppose que le coefficient de Poisson de la plaque FGM est constant en tout point de la plaque ; d'ailleurs cette propriété est sensiblement la même pour les matériaux avec lesquels on va faire l'étude.

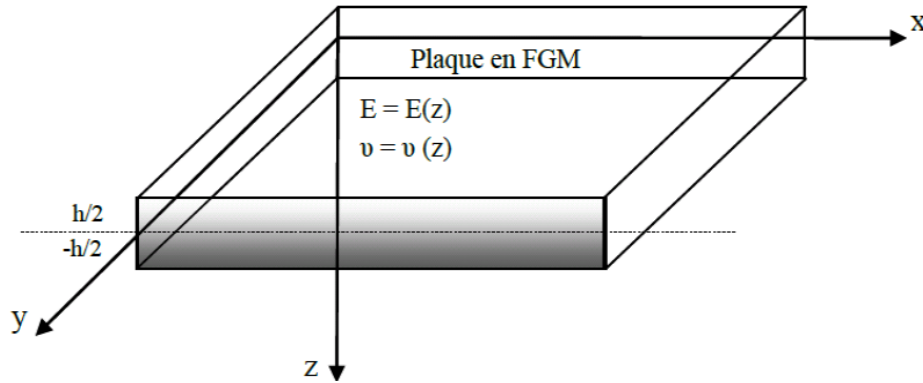


Figure II.9 : Les dimensions de la plaque FGM

Alors, le module de Young change suivant la direction de l'épaisseur de la plaque FGM, la plupart des chercheurs emploient trois fonctions pour décrire la variation de la fraction volumique et qui sont :

- La fonction de puissance (P-FGM).
- La fonction sigmoïde (S-FGM).
- La fonction exponentielle (E-FGM).

II.6.1. Les propriétés matérielles de la plaque P-FGM :

On assume que la fraction de volume du P-FGM suit une fonction de loi de puissance :

$$g(z) = \left(\frac{2.z + h}{2.h} \right)^n \quad (\text{II-1})$$

Où n est un paramètre du matériau et h est l'épaisseur de la plaque, z est la coordonnée dans la direction de l'épaisseur.

Une fois que la fraction de volume local $g(z)$ est définie, les propriétés matérielles d'une plaque P- FGM peuvent être déterminées par la loi de mélange :

$$E(z) = (E1 - E2) \left(\frac{2.z + h}{2.h} \right)^n + E2 \quad (\text{II-2})$$

$$V(z) = (V1 - V2) \cdot \left(\frac{2 \cdot z + h}{2 \cdot h} \right)^n + V2 \tag{II-3}$$

Où E_1 et E_2 sont respectivement les modules de Young de la surface supérieure et de la surface inférieure de la plaque FGM. La variation du module de Young dans la direction d'épaisseur de la plaque P-FGM est représentée sur la figure II.10, il apparaît clairement que le module de Young change rapidement au voisinage de surface inférieure pour $n > 1$, et croît rapidement près de la surface supérieure pour $n < 1$.

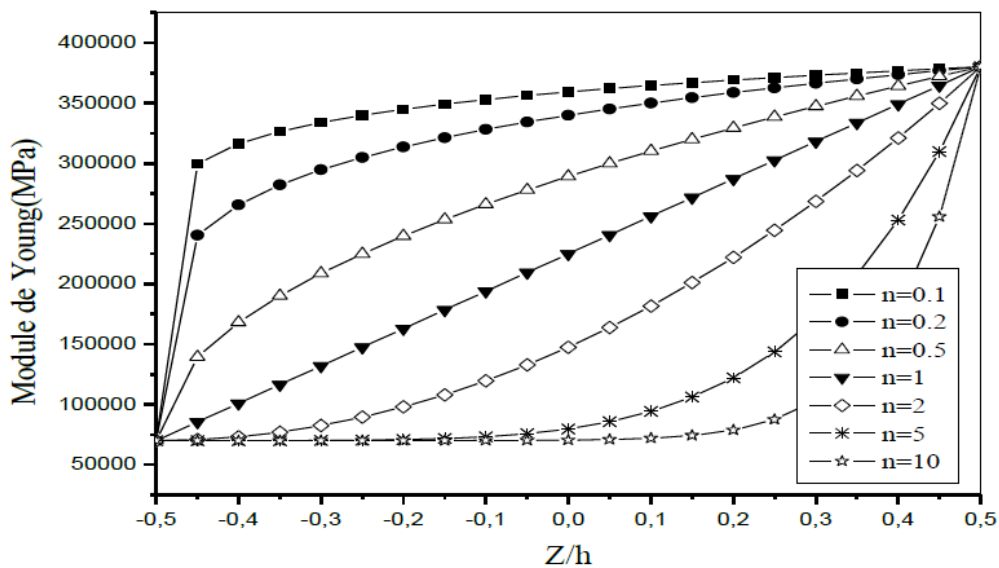


Figure II.10 : Variation du module de Young d'une plaque P-FGM

II.6.2. Les 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'interface où le matériau est continu mais change rapidement [G. Bao., L. Wang 34 ; Lee Y.D. Erdogan F]. Par conséquent, [Chung Y.L., Chi S.H] ont défini la fraction de volume de la plaque S-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:

$$g1(z) = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{h}{2} - z}{\frac{h}{2}} \right)^n \quad \text{pour} \quad 0 \leq z \leq \frac{h}{2} \tag{II-4}$$

$$g_2(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{h}{2} + z}{\frac{h}{2}} \right)^n \quad \text{pour} \quad -\frac{h}{2} \leq z \leq 0 \quad (\text{II-5})$$

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

$$E(z) = g_1(z).E_1 + [1 - g_1(z)]E_2 \quad \text{pour} \quad 0 \leq z \leq \frac{h}{2} \quad (\text{II-6})$$

$$E(z) = g_2(z).E_1 + [1 - g_2(z)]E_2 \quad \text{pour} \quad -\frac{h}{2} \leq z \leq 0 \quad (\text{II-7})$$

La figure II.11 montre que la variation du module de Young des équations (II-6) et (II-7) représente des distributions sigmoïdes, donc la plaque FGM est ainsi appelée (Plaque S-FGM)

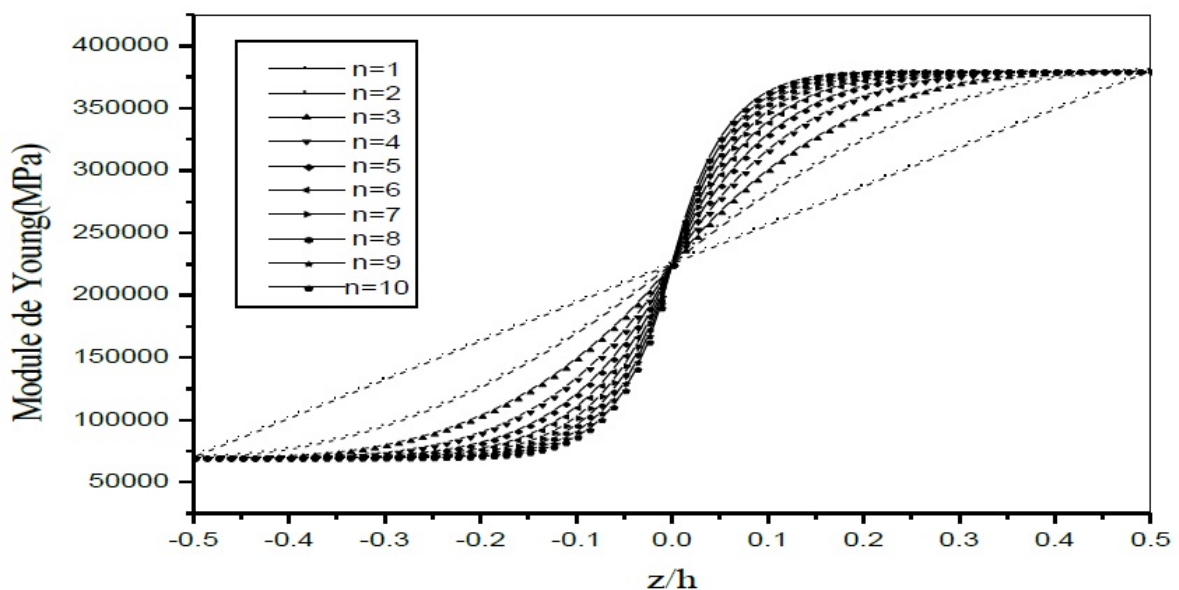


Figure II.11 : variation du module de Young d'une plaque S-FGM

II.6.3. Les 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, [33] :

$$E(z) = E_2.e^{B(z+\frac{h}{2})} \quad (\text{II-8})$$

Avec :

$$B = \frac{1}{h} \ln \left(\frac{E_1}{E_2} \right) \quad (\text{II-9})$$

La variation du module de Young à travers l'épaisseur de la plaque E-FGM est représentée dans la figure II.12. [Chedad 2016]

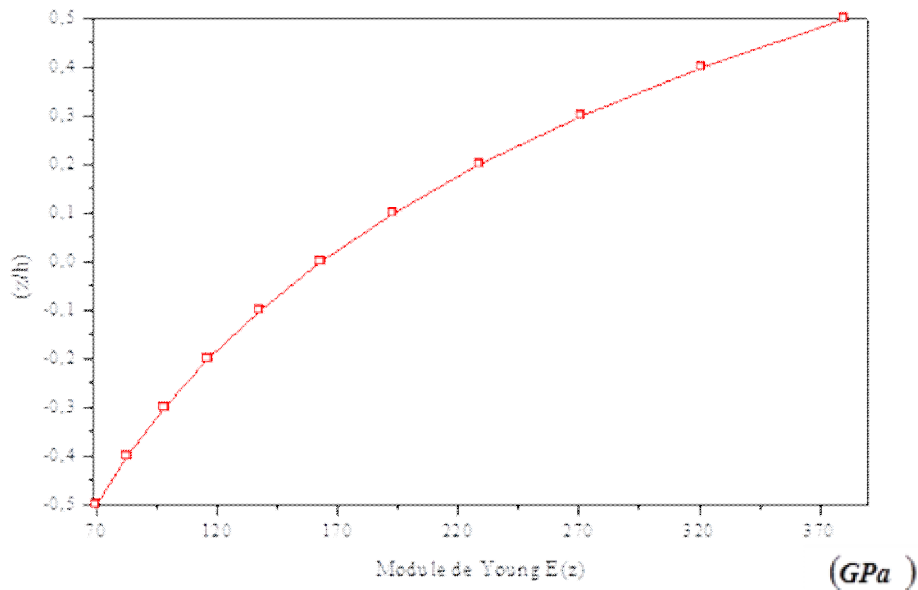


Figure II.12 : Variation du module de Young dans une plaque E-FGM.

II.6 .2. Les propriétés matérielles de la plaque selon le modèle de Mori Tanaka :

Selon le modèle de Mori Tanak le module de Young est exprimé comme :

$$E(z) = E2 + (E1 - E2) \frac{Vc}{1 + (1 - Vc) \left(\frac{E1}{E2} - 1 \right) \frac{(1 + V)}{3 - 3V}} \quad (\text{II-10})$$

Où $Vc = \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^p$ est la fraction volumique de céramique. [**Huu-Tai T.Seung-Eock K**]

II.7.Conclusion :

Les avancées significatives dans les techniques de fabrication et de transformation au cours de la dernière décennie ont permis de produire les FGM en utilisant des procédés qui permettent d'offrir une grande latitude dans la confection de la microscopie et la composition matérielle.

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu sur les matériaux à gradients évalués «FGM» : leur développement, leur concept, leurs propriétés, leurs principales étapes de fabrication. Ainsi les différentes lois qui servent à décrire la variation des propriétés matérielles (module de Young, coefficient de poisson...).

Χηαπιτρε ΙΙΙ

*Comportement des poutres en
béton armé renforcées par
matériaux composites*

III.1. Introduction

Différentes techniques de réparation, de renforcement et de maintenance des ouvrages sont appliquées depuis plusieurs années et des travaux de recherches sont en cours. La technique de renforcement par collage externe de composite à fibres de carbone peut contribuer à la réparation rapide et efficace des structures, comme elle peut aussi rendre aux éléments porteurs leur résistance, leur rigidité et leur portance.

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. En effet, la configuration d'essais réalisée le plus souvent est la flexion trois ou quatre points car elle se rapproche le plus de la réalité. Les matériaux composites sont appliqués à la face de tension inférieure d'une poutre en béton dans le but de la renforcer, l'objectif du présent chapitre est l'étude du comportement mécanique, les mécanismes de rupture et le décollement du renfort dans l'élément.

III.2. Comportement mécanique et les modes de ruptures d'une poutre en béton armé :

Le comportement global, d'une poutre en béton armé soumise à un essai de flexion trois points ou quatre points (Figure III.1), est composé de 3 phases.

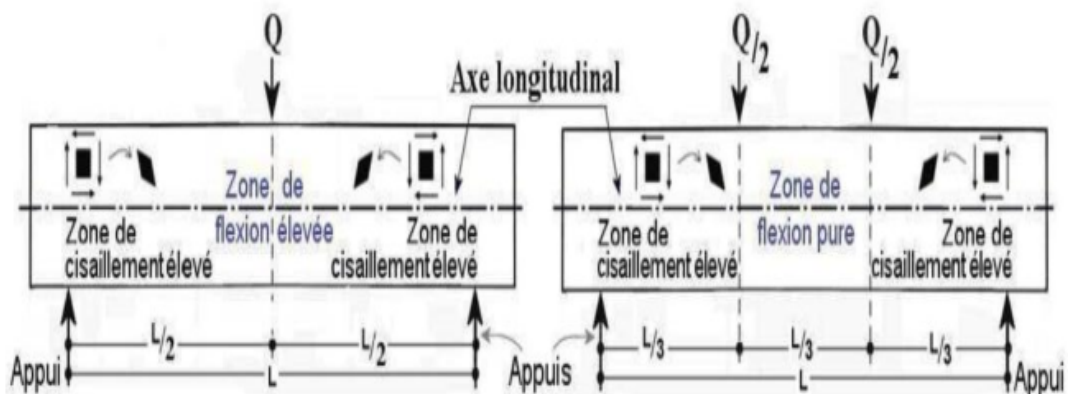


Figure III.1. Représentation des zones des contraintes élevées d'une poutre chargée en flexion 3 ou 4 points.. [Chedad 2016]

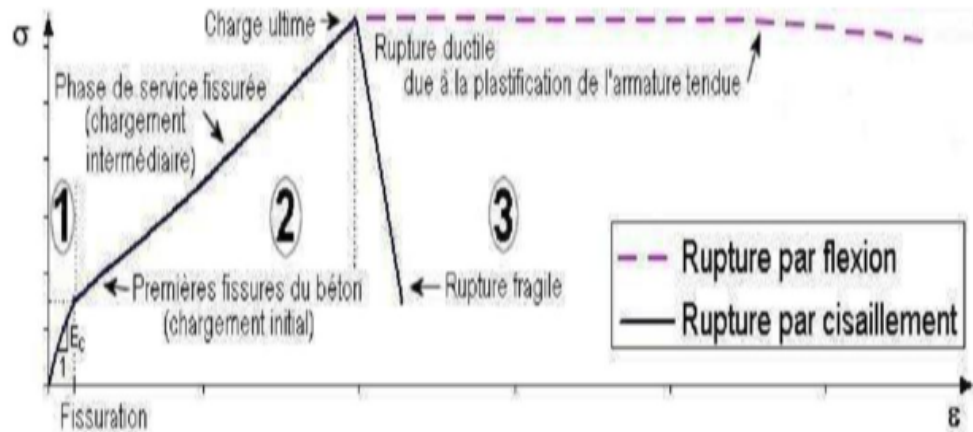


Figure III.2. Représentation graphique de la contrainte (σ) en fonction de la déformation (ϵ) d'un élément en béton armé. [Chedad 2016]

La 1ere phase linéaire correspond au comportement élastique de service des poutres non fissurées. La 2ème phase linéaire correspond au comportement de service mais lorsque la poutre est fissurée.

Pendant cette phase, il n'existe pas de différence notable du développement de la fissuration initiale que la poutre ait été endommagée par cisaillement ou par flexion.

De toutes les façons, la fissuration commence avec l'apparition de fissures due à la flexion dans la partie inférieure centrale de la poutre. Ensuite, ces premières fissures dites de flexion se propagent vers le haut de la poutre (Figure III.3). Les fissures dans les zones de cisaillement élevé se propagent dues à la contrainte principale oblique. Ces dernières fissures sont appelées fissures de cisaillement par flexion [Nawy R],[Gonzales Cuevas O ;Robles F 2002].

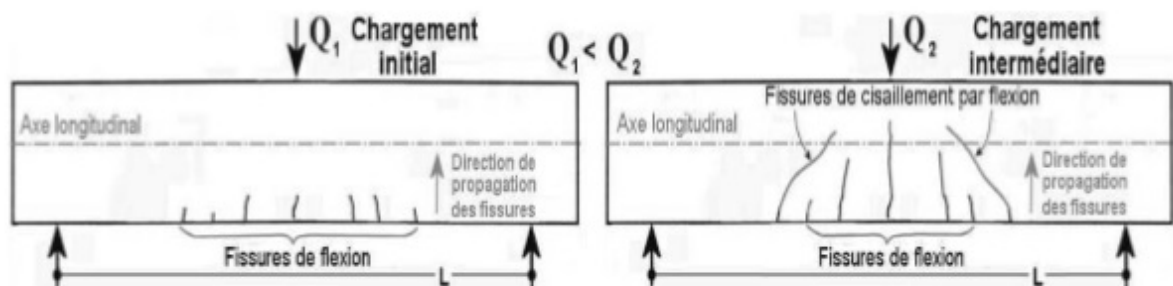


Figure III.3 : Représentation de la fissuration initiale et intermédiaire par flexion d'une poutre en béton armé (BA). [Chedad 2016]

La principale différence, entre l'endommagement par cisaillement et celui par flexion, se constate à la rupture de la poutre : 3ème phase du comportement.

Deux mécanismes principaux de rupture existent :

✚ **Rupture par flexion (F) ou rupture par cisaillement :**

La rupture par flexion peut se produire :

- Par la plastification de l'armature tendue ou
- Par compression du béton associée à la plastification de l'armature tendue.

✚ **La rupture par cisaillement est due soit à :**

- La contrainte principale oblique (CO) ;
- La compression par cisaillement (CC) ;
- L'adhérence par cisaillement (AC) ;

Ces mécanismes de rupture dépendent de la résistance des matériaux, des dimensions de la structure et du type de chargement. La résistance à la flexion d'une poutre en béton armé est apportée principalement par l'armature tendue et les propriétés du béton. La résistance aux efforts tranchants est assurée par l'armature transversale (cadres) et les caractéristiques du béton. [Croston T 2006].

III.3. Comportements des poutres en béton armé renforcées par des plaques en matériaux composites sous chargement statique :

L'utilisation de matériaux composites FRP associé à des colles 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 composite sur des surfaces tendues augmente la résistance ultime des poutres renforcées et en diminuant la flèche des structures figure (III.4), il augmente également leur raideur et limitant ainsi la propagation des fissures.

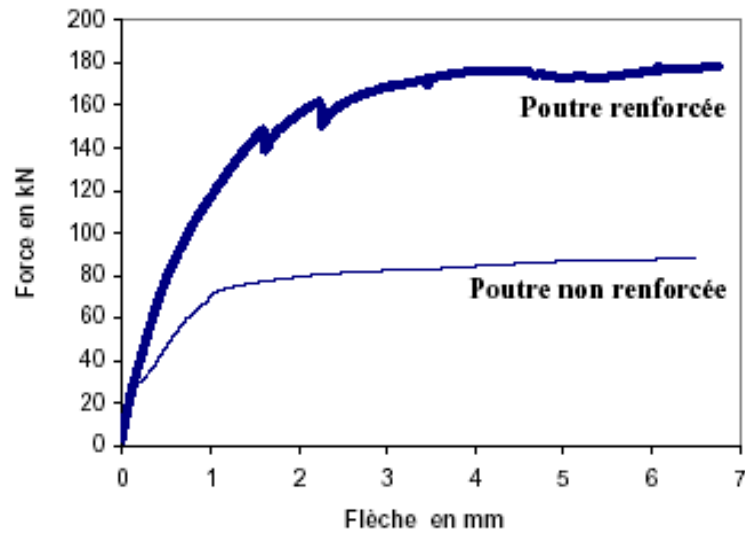


Figure III. 4 : comparaison de comportement entre les poutres renforcées et celle non renforcées. [Chedad 2016]

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.

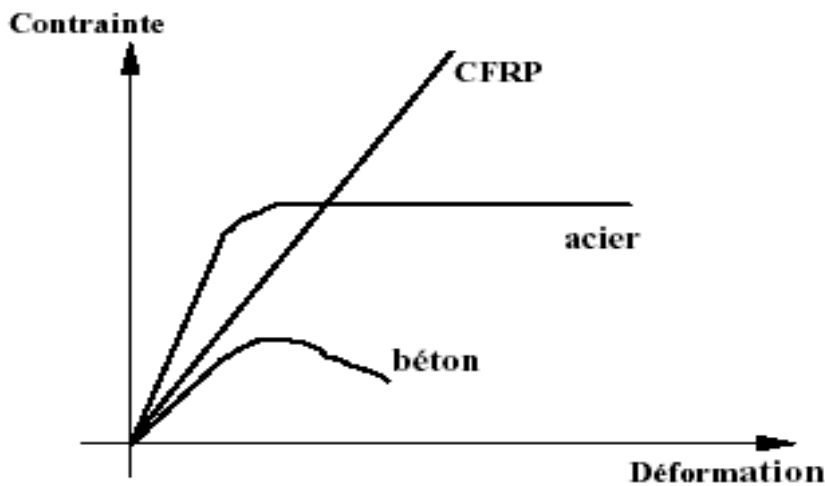


Figure III.5 : comparaison de comportement entre différents matériaux. [Chedad 2016]

Le matériau composite est un matériau élastique dont le comportement diffère de celui du béton et de celui des aciers figure (III.5), l'adhésion des lamelles composite sur des surfaces en béton armé provoque donc une modification des comportements structuraux comparativement à ceux des structures en béton armé non renforcées.

III.4. Analyse du comportement mécanique d'une poutre renforcée :

Le comportement structural d'une poutre renforcée dépend de l'interaction de chacune des sections de la figure III.6.

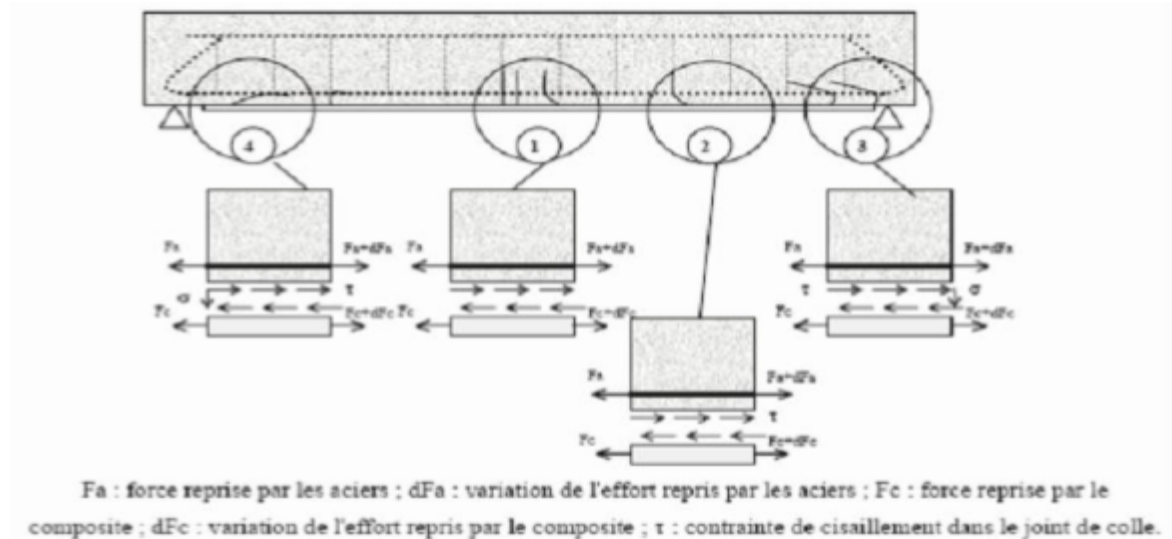


Figure III.6 : Comportement structural d'une poutre renforcée. [Chedad 2016]

III.4.1. La section centrale (1) :

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

III.4.2. La section intermédiaire (2) :

Dans cette section, les contraintes de cisaillement ne sont pas nulles. Deux paramètres peuvent alors modifier l'équilibre de la section :

Les caractéristiques mécaniques et géométriques du joint de colle (module et épaisseur) et l'intensité des contraintes. Pour la section, les conséquences des interactions de chacun des paramètres sont une perte d'effort dans le composite. Cette perte d'effort implique alors une redistribution des efforts dans la section vers les aciers.

III.4.3. La section d'extrémité (3 et 4) :

Cette section est soumise à un couple d'efforts défini par de nombreux auteurs dont [Taljsten B 1997] ceux-ci ont mis en évidence la présence de surcontrainte d'extrémité et l'existence de surcontrainte normale localisées en extrémité de la plaque.

La présence de ces surcontraintes localisées influence notamment le mode de rupture. Deux cas peuvent se produire :

1- Le plan de collage n'est pas suffisamment résistant ; la rupture se produit alors par décollement de la plaque composite.

2- Le plan de collage est suffisamment résistant, dans ce cas, les contraintes normales et tangentielles créent une rupture dans le béton situé entre les armatures et les aciers. La combinaison des actions normales et tangentielles permet la formulation d'un critère de rupture dit de peeling off.

III.5. Mécanismes de rupture des poutres renforcées par composites :

Dans le cas des poutres renforcées chargées en flexion, différents mécanismes de ruptures sont constatés [Garden H.N and Holloway L.C 1998], [Smith S T and Teng J.a 2002], [Taljsten B 2003], [Wu Zy2004]. Ces mécanismes peuvent être regroupés en trois causes principales :

Rupture due à la flexion, au cisaillement ou au décollement du composite. Ces causes possèdent différentes origines et des combinaisons sont possibles. Les mécanismes de rupture les plus courants sont décrits ci-dessous.

III.5.1. Rupture due à la flexion :

Les mécanismes de rupture en flexion de poutres en béton armé renforcées par une plaque en composite sont produits soit par la rupture du composite, importante plastification des armatures tendues ou l'écrasement du béton comprimé.

III.5.3. Rupture du composite :

Ce mécanisme de rupture en flexion est décrit par une importante plastification de l'armature tendue et la rupture du composite en traction (figure III.7 (a)). Ce mécanisme de rupture est observé, notamment, dans les poutres faiblement ou moyennement armées et celles renforcées par le système avec fabrication du composite sur site.

III.5.3. Ecrasement du béton comprimé :

Ce mode de rupture en flexion est dû à la plastification de l'armature tendue et à la ruine du béton comprimé (figure III.7 (b)). Ce mécanisme de rupture se produit plus brutalement que le mécanisme précédent lorsque les poutres sont fortement armées. Elles sont renforcées soit par trop d'armatures, soit par trop de matériaux composites.

III.5.4. Rupture due au cisaillement :

La rupture des 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 de la plaque longitudinale et sont inclinées vers le centre de la poutre (figure III.7 (c)). Ce phénomène est une conséquence de la concentration des contraintes provenant du non continuité du tissu.

III.5.5. Rupture due au décollement :

La rupture de poutres renforcées due au décollement est la principale cause de la ruine d'éléments renforcés par le collage de plaques en composite. Le décollement peut se produire dans six parties différentes de la poutre (figure III.7). Entre l'armature tendue et l'enrobage en béton, dans l'enrobage en béton, entre le béton et l'adhésif du composite, entre l'adhésif et la plaque de composite, dans l'adhésif et 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.

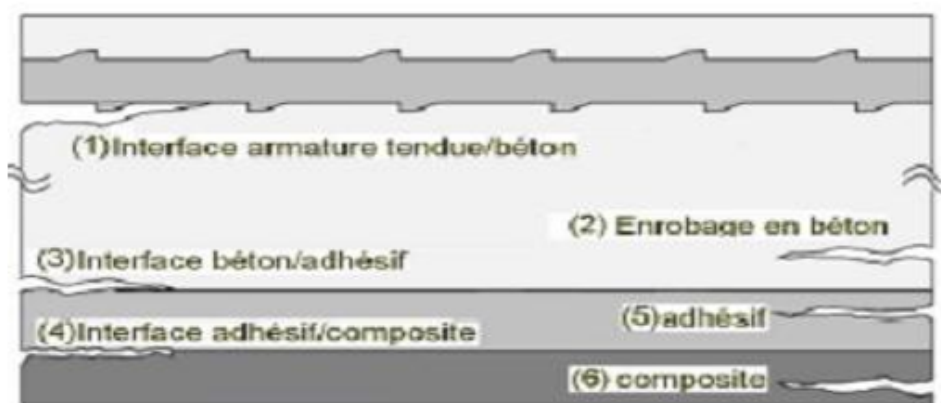


Figure III.7 : Différents types de décollements observés sur une poutre renforcée [Buyukozturk O, Gunes O and Karasa E., 2004]

III.5.6. 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 composite (figure III.7 (d)). Cette fissure est due aux contraintes normales et de cisaillement élevées engendrées par la fin brusque du composite [Buyukozturk O, Gunes O and Karasa E., 2004], [Colombi P, Bassetti A and Nussbaumer A 2003], [Gao B, Kim J.K, and Leung C.H 2003], [Mukhopadhyaya P and Swamy N 2001], [Saadatmanesh H and Malek A.M., ASCE vol 2 (4), 158-164], [Tumilialan G, Serra P, Nanni A and Belarbi A 1999] et [Varastehpour

H and Hamelin 1997]. 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.

C'est le mode de rupture prématuré le plus indiqué dans la littérature technique. Une image typique d'une telle défaillance est montrée sur la figure

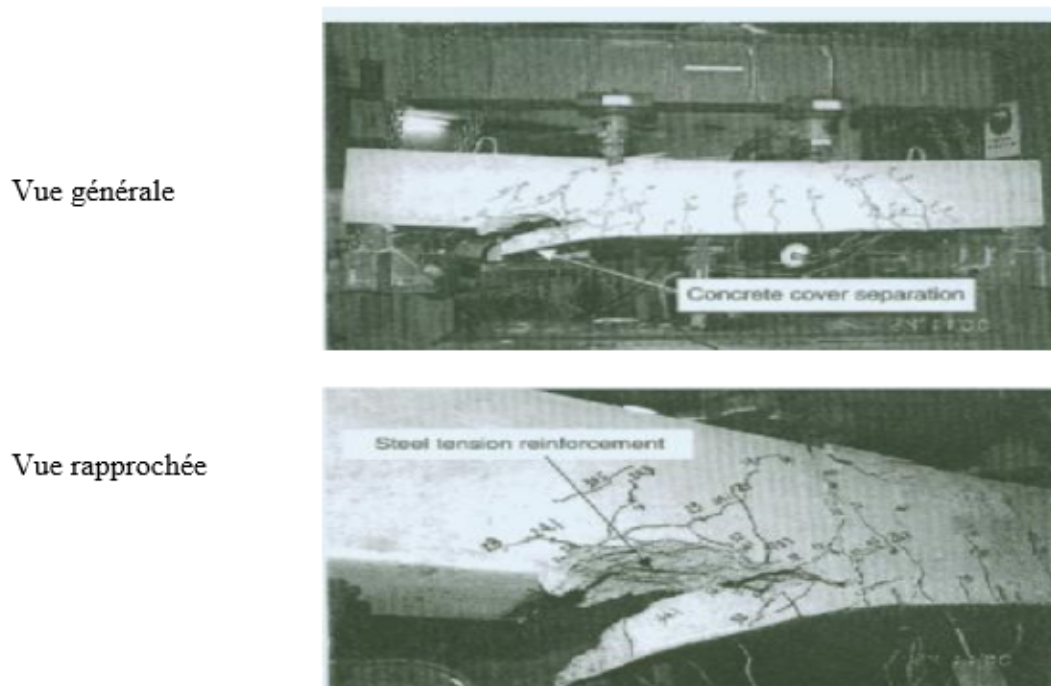


Figure III.8 : Poutre en BA renforcée - séparation de béton d'enrobage. [Chedad 2016]

On croit généralement que la rupture de l'enrobage de béton est initiée par la formation d'une fissure derrière l'extrémité de la plaque de FRP, endroit où se développent des contraintes élevées de cisaillement et normales à cause de l'arrêt brusque de la plaque. Une fois cette fissure formée, elle se propage au niveau du renfort de tension et progresse horizontalement en son long aboutissant au résultat de la séparation de l'enrobage du béton. La figure (III.6.b) montre une vue rapprochée de l'extrémité de la plaque détachée et où l'armature tendue peut être clairement aperçue. Une étude soignée sur la séparation du béton d'enrobage a été récemment entreprise à travers des essais de 3 points de flexion sur poutres et où l'un point examiné est celui de l'emplacement de l'extrémité de la plaque. La figure () montre une série de photographies de rupture de ces poutres, où a désigné la distance entre l'extrémité de plaque et l'appui est plus proche ; tandis que B désigne la portée de cisaillement. Ces essais montrent que comme l'extrémité de plaque se rapproche de l'appui, la

fissure à l'extrémité de plaque devient plus inclinée sur la figure () et le processus de rupture devient plus fragile avec une augmentation de la charge de rupture.

Ces changements sont des conséquences de la force de cisaillement devenant plus importante relativement au moment de flexion à la fin de la plaque. Il faut noter que le risque de décollement est augmenté par un certain nombre de facteurs liés à la qualité d'exécution in-situ et à l'utilisation d'adhésifs faibles. Des effets de ces facteurs peuvent être réduits au minimum si les précautions ont été prises en processus d'application.

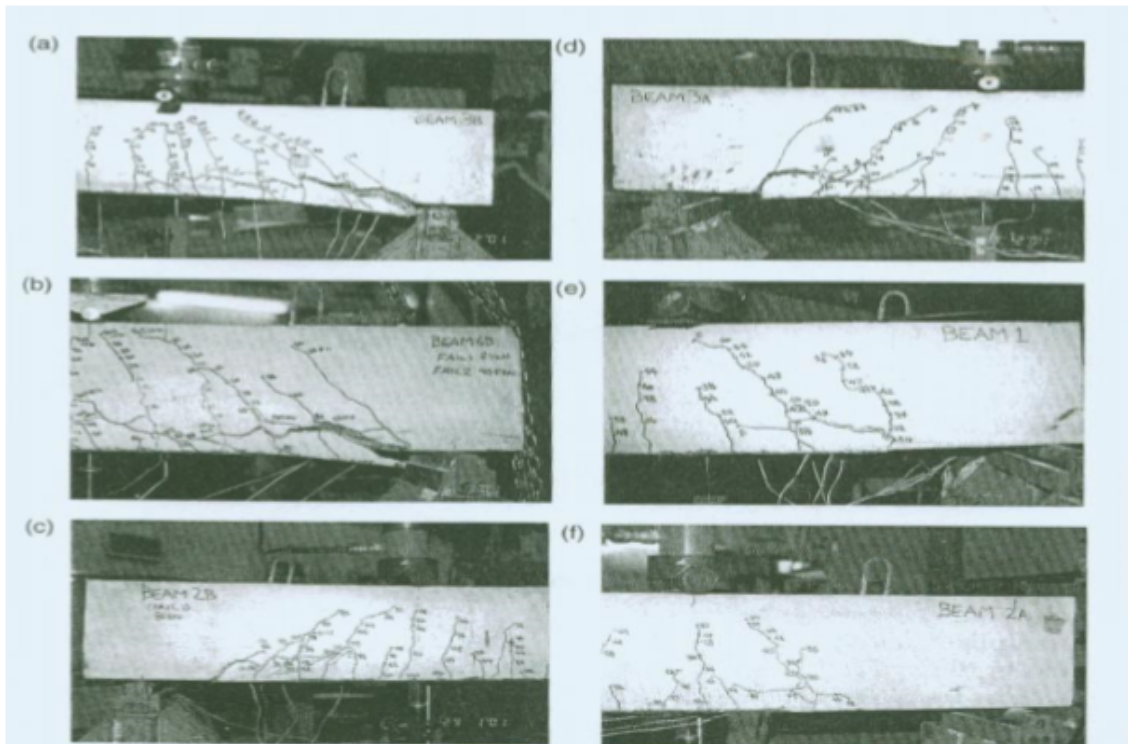


Figure III.9 : Rupture par séparation d'enrobage de béton de poutres renforcées en variant a/B : (a) 0,10; (b) 0,15 (c) 0,25; (d) 0,35; (e) 0,50; (f) 0,75.

III.6. Ancrage d'extrémité en utilisant des bandes en U:

Pour empêcher le décollement aux extrémités de la plaque, des ancrages mécaniques peuvent être installés. Un acier préfabriqué ou des bandes de FRP en U (figure III)- type commun d'ancrages des extrémités - peuvent être collés ou boulonnés aux extrémités de la plaque.

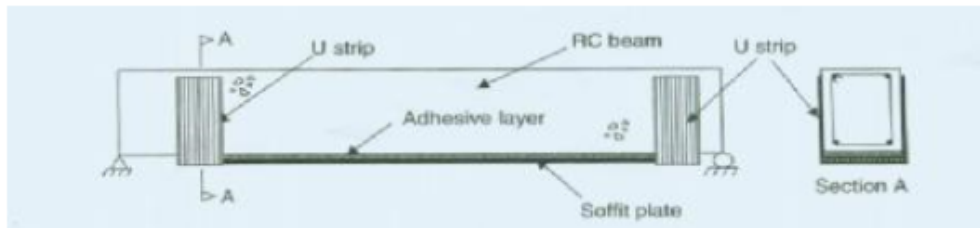


Figure III.10 : Poutre en B.A collée avec des bandes en FRP ancrées aux extrémités.

Des ancrages mécaniques peuvent être installés aux extrémités de plaque afin de retarder ou empêcher des ruptures par décollement de l'extrémité. Des essais ont été réalisés sur une série de poutres renforcées par des plaques en FRP avec l'utilisation d'ancrages à l'extrémité en U comme représenté sur la figure (III.). La largeur et le placement de ces bandes en U ont été variés. Ainsi on a observé différentes modes de ruptures comme l'illustrent-les photos suivantes :

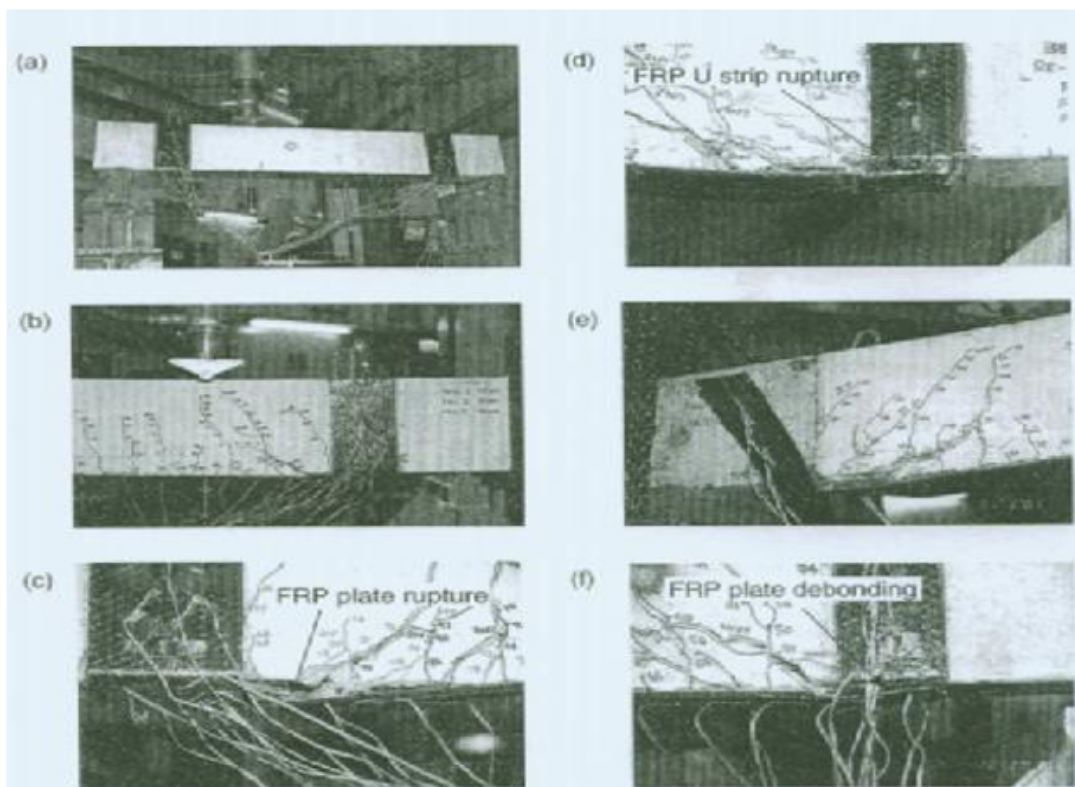


Figure III.11 : Modes des ruptures du FRP et la poutre en BA avec la bande U tenu aux extrémités : (b) la rupture dans le béton; (c) Rupture de plaque de FRP; (d) Rupture de bande de FRP en U; (e) le décollement de la Bande de FRP en U; (f) plaque FRP décollé. .

III.7. Conclusion

La technique de renforcement par les plaques de matériaux composites sur les surfaces tendues ou les surfaces latérales est un moyen très efficace pour renforcer ou réparer des structures en béton armé.

L'utilisation des matériaux composites sur les surfaces tendues améliore considérablement la résistance mécanique des poutres renforcées en diminuant la propagation de fissures, particulièrement en cas d'une poutre qui n'est suffisamment pas armée en partie tendue.

Dans ce chapitre, on a présenté le comportement d'une poutre en béton armé sous chargement statique (flexion à 3 points et 4 points) et les différents modes de rupture ainsi que le mécanisme de rupture des poutres renforcées par composites sous chargement statique et le mode d'ancrage à l'extrémité en utilisant des bandes en U.

Χηαπιτρε Ιζ□:

*Analyse des contraintes
d'interface d'une poutre en BA
endommagée renforcée par FGM
sous précontraint*

IV.1. Introduction :

Dans des applications récentes, l'utilisation des stratifiés précontraints a été explorée dans les essais en laboratoire [Nordin H.],[Bassetti A], dans des réhabilitations de ponts [Luke S.] et d'autres types de structures [De Lorenzis L., Micelli F., la Tegola A]. La haute résistance du matériau composite peut être mieux utilisée, ce qui donne un moyen plus efficace de renforcement. Dans les structures en béton, les efforts de compression induits par la précontrainte fermeront les fissures existantes, réduiront leurs largeurs et retarderont le début de nouvelles fissures dans la structure renforcée. Également en structures en béton armé, les efforts de compression développés par la précontrainte du FRP dans la poutre en acier [A. Benachour 2008]. En outre, le renforcement par des stratifiés précontraints participe non seulement aux charges additionnelles imposées sur la structure renforcée, mais il supporte également une partie du poids propre.

Dans ce chapitre, une nouvelle solution générale est développée pour prédire les contraintes d'interfaces de cisaillement et normale dans les poutres en béton armé endommagée simplement appuyées et réparées par une plaque FGM sous force de précontrainte. La poutre considérée est soumise à une charge uniformément répartie.

IV. 2. Hypothèse de la présente méthode :

Dans cette analyse, les hypothèses suivantes sont faites :

- ❖ Tous les matériaux étudiés ont un comportement élastique et linéaire.
- ❖ La poutre est simplement appuyée et obéit à la loi de Navier –Bernoulli c'est-à-dire qu'après déformation longitudinale de la poutre, la section plane reste plane et identique à elle-même.
- ❖ Aucun glissement n'est permis entre les interfaces (c'est-à-dire qu'il y a un lien parfait entre face inférieure de la poutre-adhésif- plaque de FRP).
- ❖ Les déformations, dues à la flexion, de l'adhésif sont négligées.
- ❖ On suppose que la couche adhésive est mince de sorte que les efforts puissent être considérés comme constants à travers l'épaisseur de la couche.
- ❖ La rigidité à la flexion de la poutre à renforcer est beaucoup plus grande que la rigidité de la plaque de composite

IV.3. Les propriétés des matériaux de plaques endommagées :

[Mazard 1984] propose un modèle d'endommagement isotrope dans lequel la configuration d'énergie élastique de déformation pour une plaque endommagée est équivalent

à la configuration d'énergie élastique de déformation pour une plaque non endommagée. Sur la base de cette hypothèse, les relations de constants élastiques d'état endommagé et d'état non endommagé peut être exprimé comme :

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

Avec \bar{E} , E et d sont les modules d'élasticité endommagée et le module d'élasticité non endommagée du béton et le variable d'endommagée.

Le module de Young qui varie en fonction de (z) est exprimé comme suit [Hadji 2015] :

$$E(z) = E_m + (E_c - E_m) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^K - (E_c - E_m) \frac{n}{2} \quad (\text{IV.2})$$

E_c et E_m sont les modules de Young des faces supérieure et inférieure de la plaque et K est la propriété matérielle, n : est l'indice de porosité.

Pour les FGM élastiques et isotropes, les relations constitutives peuvent être écrites comme :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (\text{IV.3})$$

Ou $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{yx})$ et $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{yx})$ sont respectivement les composantes de contraintes et de déformations.

Les coefficients de rigidité Q_{ij} , peuvent être exprimés comme suit :

$$Q_{11} = Q_{22} = \frac{E(z)}{1-\nu^2} \quad (\text{IV.4})$$

$$Q_{12} = \frac{\nu E(z)}{1-\nu^2} \quad (\text{IV.5})$$

$$Q_{44} = Q_{55} = Q_{66} = \frac{E(z)}{2(1+\nu)} \quad (\text{IV.6})$$

Ou les composantes de rigidité A_{ij} et D_{ij} sont définis comme :

$$A_{ij} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} Q_{ij} dz \quad (IV.7)$$

$$D_{ij} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} Q_{ij} z^2 dz \quad (IV.8)$$

A_{11}' et D_{11}' sont définis comme :

$$A_{11}' = \frac{A_{22}}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2} \quad (IV.9)$$

$$D_{11}' = \frac{D_{22}}{D_{11}D_{22} - D_{12}^2} \quad (IV.10)$$

A_{11}' : est le premier terme de la matrice inverse $[A_{ij}']$ de la matrice de membrane $[A_{ij}]$.

D_{11}' : est le premier terme de la matrice inverse $[D_{ij}']$ de la matrice de membrane $[D_{ij}]$. Par l'application des conditions d'équilibre de la poutre en béton, nous avons :

IV.4. Analyse :

Un élément dx de la poutre renforcée (Figure IV.1) est représenté dans la figure IV.2. Elle montre d'une part, les contraintes de cisaillement $\tau(x)$ et les contraintes normales d'interface $\sigma(x)$; d'autre part, elle indique la convention de signe utilisé pour le moment de flexion, l'effort tranchant, l'effort normal et le chargement appliqué.

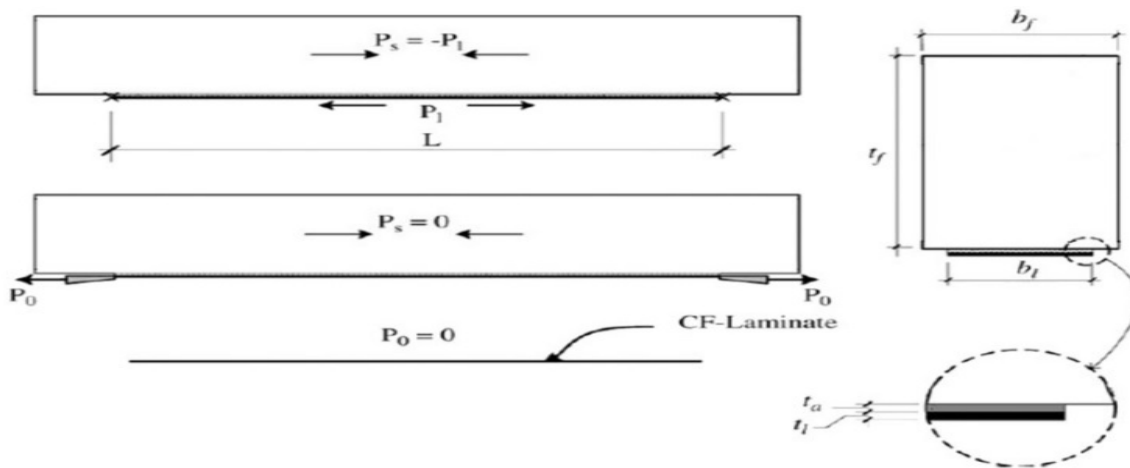


Figure IV.1 : Poutre en béton simplement appuyée renforcée par collage d'une plaque composite.

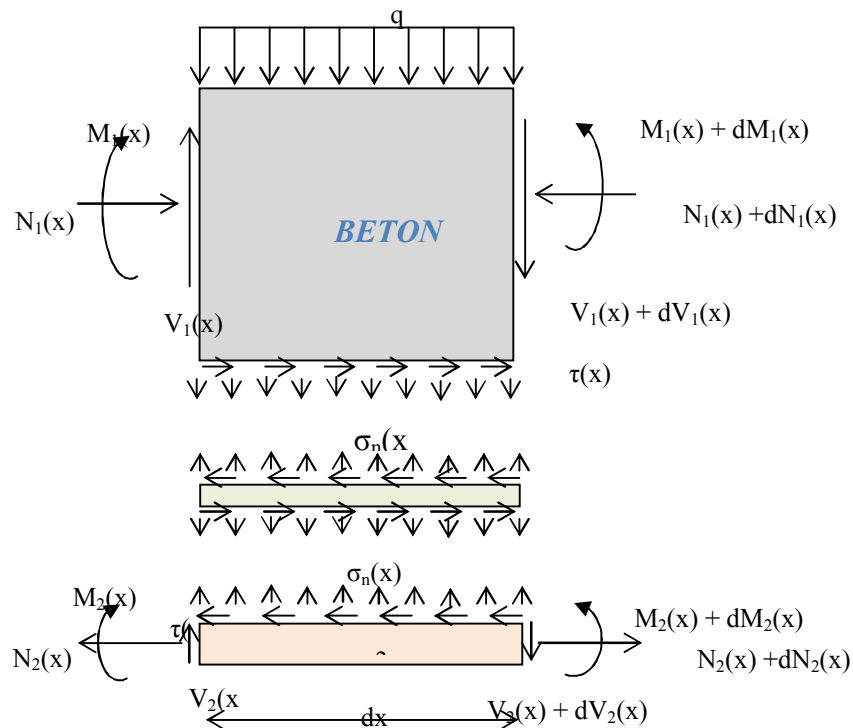


Figure IV.2 : un segment différentiel de la poutre renforcée par collage de composite.

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

IV.4.1. Equations d'élasticité :

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

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \quad (\text{IV.11})$$

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

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = A_{11}' \frac{(N_2(x) + P_0)}{b_2} - D_{11}' \frac{y_2}{b_2} M_2(x) \quad (\text{IV.12})$$

Où $u_1(x)$ et $u_2(x)$ sont les déplacements horizontaux de la poutre en béton et la plaque composite respectivement. $M_1(x)$ et $M_2(x)$ sont respectivement les moments de flexion appliqués à la poutre en béton et la plaque composite ; E_1 est le module de Young du béton ; I_1 le moment d'inertie, e est la distance entre l'axe neutre à la fibre inférieure du béton, N_1 et N_2 sont les forces axiales appliquées au béton et à la plaque composite respectivement, b_2 et t_2 sont la largeur et l'épaisseur de la plaque de renforcement , $[A']=[A^{-1}]$ est l'inverse de la matrice de membrane $[A]$, $[D']=[D^{-1}]$ est l'inverse de la matrice de flexion.

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

$$\text{Dans la direction x: } \frac{dN_1(x)}{dx} = -b_2 \tau(x) \quad (\text{IV.13})$$

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

$$\text{Dans la direction y : } \frac{dV_1}{dx} = -[\sigma_n(x)b_2 + qb_1] \quad (\text{IV.14})$$

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

$$\text{Le moment d'équilibre: } \frac{dM_1}{dx} = V_1(x) - \tau(x)b_2 \cdot y_1 \quad (\text{IV.15})$$

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

$$\text{Dans la direction } x : \frac{dN_2(x)}{dx} = b_2 \tau(x) \quad (\text{IV.16})$$

$$\text{Dans la direction } y : \frac{dV_1}{dx} = \sigma_n(x) b_2 \quad (\text{IV.17})$$

$$\text{Le moment d'équilibre : } \frac{dM_2}{dx} = V_2(x) - \tau(x) b_2 \cdot y_2 \quad (\text{IV.18})$$

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

IV.4.2. La distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite – Béton :

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

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

$$\tau(x) = K_s \Delta u(x) = K_s [u_2(x) - u_1(x)] \quad (\text{IV.19})$$

Où K_s est la rigidité au cisaillement de la couche d'adhésive par unité de longueur. A partir de l'équation (IV.19) on peut en déduire l'expression de K_s qui est donnée par :

$$K_s = \frac{\tau(x)}{\Delta u(x)} = \frac{\tau(x)}{\Delta u(x)/t_a} \frac{1}{t_a} = \frac{G_a}{t_a} \quad (\text{IV.20})$$

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

En différentiant les équations (IV.19), (IV.11) et (IV.12) par rapport à x , et en négligeant le moment de flexion de la plaque composite nous aurons :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \left[\left(A_{11}' \frac{(N_2(x) + P_0)}{b_2} - D_{11}' \frac{y_2}{b_2} M_2(x) \right) - \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{3G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \right) \right] \quad (\text{IV.21})$$

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:

$$M_1(x) = RM_2(x) \quad (\text{IV.22})$$

Avec :

$$R = \frac{E_1 I_1 D'_{11}}{b_2} \quad (\text{IV.23})$$

Le moment total d'équilibre de l'élément différentiel de la figure (IV.22) est donné par :

$$M_T(x) = M_1(x) + M_2(x) + N(x)(y_1 + y_2 + t_a) \quad (\text{IV.24})$$

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

$$N(x) = N_1(x) = N_2(x) = b_2 \int_0^x \tau(x) dx \quad (\text{IV.25})$$

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

$$M_1(x) = \frac{R}{R+1} \left[M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx \right] \quad (\text{IV.26})$$

$$M_2(x) = \frac{1}{R+1} \left[M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a) dx \right] \quad (\text{IV.27})$$

En dérivant les expressions (IV.26) et (IV.27) nous aurons :

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = \frac{R}{R+1} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (\text{IV.28})$$

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = \frac{1}{R+1} [V_T(x) - b_2 \tau(x)(y_1 + y_2 + t_a)] \quad (\text{IV.29})$$

En différentiant l'équation (IV.21) nous aurons :

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} = K_s \left[\frac{A'_{11}}{b_2} \frac{dN_2(x)}{dx} - D'_{11} \frac{y_2}{b_2} \frac{dM_2(x)}{dx} - \frac{y_1}{E_1 I_1} \frac{dM_1(x)}{dx} + \frac{1}{E_1 A_1} \frac{dN_1(x)}{dx} - \frac{t_1}{3G_1} \frac{d^2 \tau_a}{dx^2} \right] \quad (\text{IV.30})$$

La substitution de l'effort tranchant (équations (IV.28) et (IV.29)) et l'effort normal (équations (IV.25)) dans l'équation (IV.30) nous permet d'obtenir l'équation différentielle des contraintes d'interface de cisaillement :

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} - K_1 \left(A'_{11} + \frac{b_2}{E_1 A_1} + \frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 D'_{11} + b_2} b_2 D'_{11} \right) \tau(x) + K_1 \left(\frac{(y_1 + y_2)}{E_1 I_1 D'_{11} + b_2} D'_{11} \right) V_T(x) = 0 \quad (\text{IV.31})$$

Avec :

$$K_1 = \frac{1}{\left(\frac{t_a}{G_a} + \frac{t_1}{3G_1} \right)} \quad (\text{IV.32})$$

La solution de l'équation différentielle (équation (IV.31)) ci-dessus est donné par :

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 V_T(x) \quad (\text{IV.33})$$

Avec :

$$\lambda^2 = K_1 \left(A'_{11} + \frac{b_2}{E_1 A_1} + \frac{(y_1 + y_2)(y_1 + y_2 + t_a)}{E_1 I_1 D'_{11} + b_2} b_2 D'_{11} \right) \quad (\text{IV.34})$$

$$m_1 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left(\frac{(y_1 + y_2)}{E_1 I_1 D'_{11} + b_2} D'_{11} \right) \quad (\text{IV.35})$$

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

$$\tau(x) = -B_2 e^{-\lambda x} + m_1 q \left(\frac{l}{2} - a - x \right) \quad (\text{IV.36})$$

Avec :

$$B_2 = \frac{K_1}{\lambda} \left[\frac{A'_{11}}{b_2} P_0 - \frac{y_1}{E_1 I_1} \frac{qa}{2} (l - a) \right] + \frac{m_1}{\lambda} q \quad (\text{IV.37})$$

IV.4.3 La distribution des contraintes normales dans l'interface composite – Acier

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

$$\sigma_n(x) = K_n \Delta w(x) = K_n [w_2(x) - w_1(x)] \quad (\text{IV.38})$$

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

$$K_n = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)} = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x) / t_a} \left(\frac{1}{t_a} \right) = \frac{E_a}{t_a} \quad (\text{IV.39})$$

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

En dérivant l'équation (IV.38) deux fois il en résulte :

$$\frac{d^2 \sigma_n(x)}{dx^2} = \frac{Ea}{ta} \left[\frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} - \frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} \right] \quad (\text{IV.40})$$

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

$$\frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} = -\frac{M_1(x)}{E_1 I_1}, \quad \frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} = -\frac{D'_{11} M_2(x)}{E_2 I_2} \quad (\text{IV.41})$$

En se basant sur les équations d'équilibre (IV.14) (IV.18), les équations différentielles d'équilibre des adhérents 1 et 2 exprimées en fonction des contraintes de cisaillement et des contraintes normales sont données comme suit :

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

$$\text{Adhérent 1 : } \quad \frac{d^4 w_1(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_1 I_1} b_2 \sigma_n(x) + \frac{y_1}{E_1 I_1} b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_1 I_1} \quad (\text{IV.42})$$

$$\text{Adhérent 2 : } \quad \frac{d^4 w_2(x)}{dx^4} = -D'_{11} \sigma_n(x) + D'_{11} y_2 \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (\text{IV.43})$$

La substitution des équations (IV.42) et (IV.43) dans la quatrième dérivée de la contrainte normale obtenue à partir de l'équation (IV.38) donne l'équation différentielle régissant la contrainte normale d'interface :

$$\frac{d^4 \sigma_n(x)}{dx^4} + \frac{Ea}{ta} \left(D'_{11} + \frac{b_2}{E_1 I_1} \right) \sigma_n(x) - \frac{Ea}{ta} \left(\frac{y_1 b_2}{E_1 I_1} - D'_{11} y_2 \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{qEa}{ta E_1 I_1} = 0 \quad (\text{IV.44})$$

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

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{IV.45})$$

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 :

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

Où :

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Ea}{4ta} \left(D'_{11} + \frac{b_2}{E_1 I_1} \right)} \quad (\text{IV.47})$$

$$n_1 = \left(\frac{y_1 b_2 - D'_{11} E_1 I_1 y_2}{D'_{11} E_1 I_1 + b_2} \right) \quad (\text{IV.48})$$

$$n_2 = \frac{1}{D_{11} E_1 I_1 + b_2} \quad (\text{IV.49})$$

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

$$C_1 = \frac{K_n}{2\beta^3 E_1 I_1} [V_T(0) + \beta M_T(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left(\frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \quad (\text{IV.50})$$

$$C_2 = -\frac{K_n}{2\beta^2 E_1 I_1} M_T(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad (\text{IV.51})$$

Ou :

$$n_3 = b_2 \frac{Ea}{ta} \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} - \frac{D_{11} y_2}{b_2} \right) \quad (\text{IV.52})$$

IV.5. Conclusion:

Dans ce chapitre une méthode simple a été développée pour déterminer les contraintes d'interface d'une poutre en béton endommagée réparée par une plaque FGM sous le précontraint chargé par une charge uniformément répartie.

Χηαπιτρεις:

*Analyse des résultats et
discussion*

V.1. Introduction

Ce chapitre est exclusivement consacré à la discussion des résultats ainsi qu'une étude paramétrique montrons la comparaison entre la présente méthode a celle de [Chedad 2016] avec la variation de plusieurs paramètre que ça soit dans l'effet de la précontraint ; la variable d'endommagement ou l'épaisseur de la plaque FGM la couche d'adhésive la distance a dans chacun des cas (parfait et imparfait).

La présente méthode a été validée en comparant les résultats des contraintes d'interface avec ceux obtenus à partir de la méthode de [Chedad 2016].

Pour cela, une poutre en béton endommagée réparée par une plaque en (FGM) est analysée. La poutre est ayant une travée de 3000 mm, est simplement appuyée et soumise à une charge uniformément répartie d'une valeur de 50 KN/m. La distance de l'appui au bord de la plaque de renforcement est de 300 mm.

V.2. Vérification de la méthode :

Les caractéristiques physiques et les propriétés mécaniques des matériaux ainsi que les autres paramètres utilisés sont rapportés au tableau (V.1).

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

Matériaux	Module de Young (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)
Béton	$E_1 = 30000$ MPa		0.18	$b_1 = 200$	$t_1 = 300$
Plaque FGM	E_{sup} (alumina) = 380000 E_{inf} (aluminium) = 70000	5000	0.3	$b_2 = 200$	$t_2 = 4$
Couche d'adhésive	$E_a = 3000$		0.35	$b_a = 200$	$t_a = 2$

V.3. Validation :

Les résultats obtenus, en utilisant la méthode développée par [Chedad 2016] ainsi que ceux de la présente méthode, pour les contraintes de cisaillement et contraintes normales d'interface, sont illustrés dans la figure (V.1).

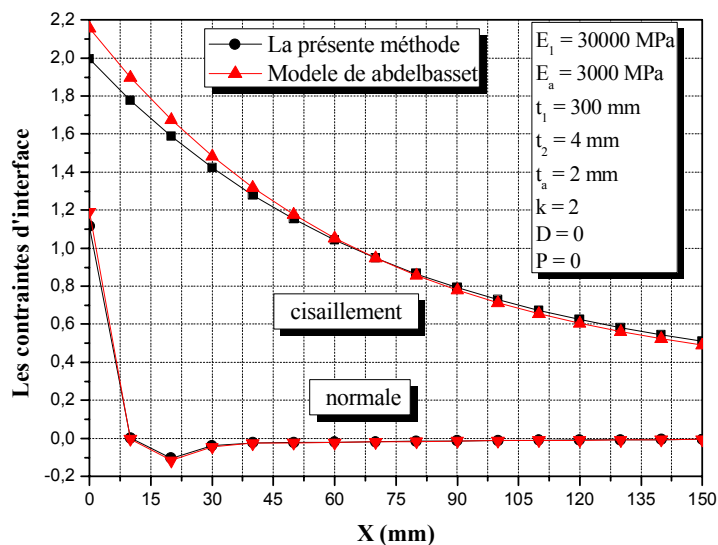
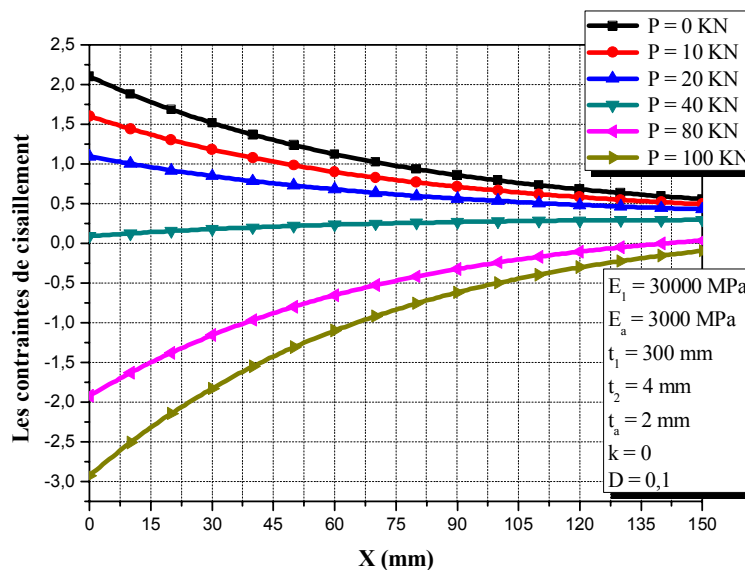


Figure V.1 : La validation de la présente méthode pour une poutre en béton armé non endommagée renforcée par une plaque FGM sous précontrainte $P = 0$.

Les résultats obtenus et présentés laissent apparaître clairement, qu’une bonne concordance entre la présente méthode et celle développée par [Chedad 2016] est observée. Les résultats des deux solutions se coïncident.

V.3.1. effet de la précontrainte :

La figure (V.2) ci-dessous montre une variation des contraintes d’interface en fonction de la variation de la force de précontrainte. Ainsi il est constaté qu’une augmentation de la force de précontrainte mène à des contraintes d’interface élevées.



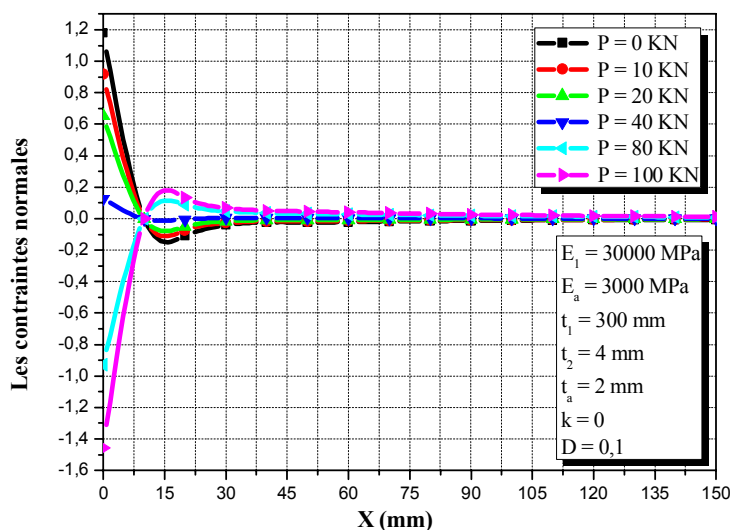


Figure V.2 : Effet de la force de précontrainte pour une poutre en béton armé endommagée réparée par une plaque FGM.

V.4. L'étude paramétrique :

V.4.1. Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésif :

L'effet de l'épaisseur de la couche d'adhésif sur la variation des contraintes d'interface est représenté sur le tableau (V.2). L'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésive mène à une réduction significative des contraintes d'interface maximales. Ainsi, l'utilisation d'une couche d'adhésive plus épaisse, particulièrement aux voisinages des bords, est fortement recommandée. En plus, ces contraintes diminuent au cours du temps pour converger vers une valeur constante.

Tableau V.2 : Influence de l'épaisseur de la colle sur une poutre en BA endommagée renforcée par FGM sous précontrainte P = 80 KN.

		<u>x = 0</u>					
P-FGM parfait		ta = 1		ta = 2		ta = 4	
		tau	sigma	tau	sigma	tau	sigma
	D = 0	-2,392	-1,404	-2,262	-1,114	-2,049	-0,846
D = 0,1	-2,023	-1,164	-1,918	-0,929	-1,746	-0,709	
D = 0,3	-1,171	-0,604	-1,115	-0,489	-1,020	-0,377	
P-FGM imparfait n=0,2		ta = 1		ta = 2		ta = 4	
		tau	sigma	tau	sigma	tau	sigma
	D = 0	-3,140	-1,964	-2,976	-1,560	-2,708	-1,189
	D = 0,1	-2,750	-1,704	-2,616	-1,360	-2,393	-1,043
D = 0,3	-1,852	-1,094	-1,774	-0,884	-1,639	-0,686	

V.4.2. Effet de l'épaisseur de la plaque FGM :

L'épaisseur de la plaque de renforcement est un facteur important dans le dimensionnement des structures renforcées. Dans le tableau (V.3), nous présentons l'effet de l'épaisseur de la plaque sur les contraintes d'interface. Ce tableau illustre la proportionnalité qui existe entre les deux paramètres précités.

Tableau V.3 : Influence de l'épaisseur de plaque FGM sur une poutre en BA endommagée renforcée par FGM sous précontrainte $P = 80 \text{ KN}$.

		$x = 0$							
<i>P-FGM</i> <i>parfait</i>		t2 = 2		t2 = 4		t2 = 6		t2 = 8	
		tau	sigma	tau	sigma	tau	sigma	tau	sigma
	D = 0	-4,974	-4,404	-2,262	-1,114	-0,920	-0,229	-0,065	0,165
D = 0,1	-4,568	-4,045	-1,918	-0,929	-0,607	-0,097	0,225	0,273	
D = 0,3	-3,616	-3,198	-1,115	-0,489	0,117	0,217	0,891	0,531	
<i>P-FGM</i> <i>imparfait</i> <i>n=0,2</i>		t2 = 2		ta = 2		t2 = 6		t2 = 8	
		tau	sigma	tau	sigma	tau	sigma	tau	sigma
	D = 0	-5,861	-5,418	-2,976	-1,560	-1,552	-0,506	-0,642	-0,034
	D = 0,1	-5,432	-5,026	-2,616	-1,360	-1,224	-0,364	-0,336	0,081
	D = 0,3	-4,429	-4,099	-1,774	-0,884	-0,461	-0,027	0,370	0,356

V.4.3. Effet de la longueur non renforcée a :

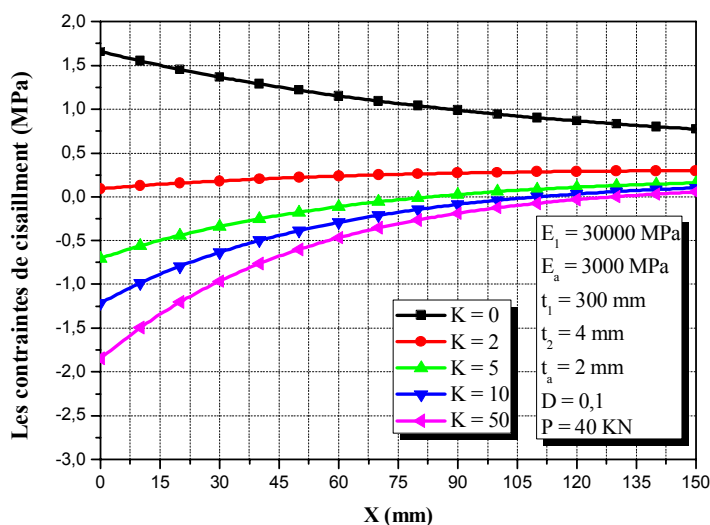
On constate que, plus la longueur « a » augmente (c.à.d. la longueur de la plaque L_p diminue) plus les contraintes d'interface maximales (contraintes au bord de la plaque) s'accroissent d'une façon significative. Ces résultats démontrent que, quel que soit le cas de renforcement, y compris le cas où le renforcement se limite à la zone centrale où le moment de flexion est maximum, il est recommandé de prolonger la plaque de renforcement le plus possible aux appuis. En plus, il peut être souligné qu'après une longue durée ; ces contraintes deviennent pratiquement constantes pour les différentes valeurs de la longueur non renforcée « a ».

Tableau V.4 : Influence de la longueur non renforcée a sur une poutre en BA endommagée renforcée par FGM sous précontrainte $P = 80 \text{ KN}$.

		$x = 0$											
<i>P-FGM</i> <i>parfait</i>		a = 50		a = 100		a = 150		a = 200		a = 250		a = 300	
		tau	sigma	tau	sigma	tau	sigma	tau	sigma	tau	sigma	tau	sigma
	D = 0	-3,546	-1,832	-3,269	-1,677	-3,002	-1,527	-2,745	-1,384	-2,498	-1,246	-2,262	-1,114
	D = 0,1	-3,264	-1,685	-2,974	-1,522	-2,694	-1,365	-2,424	-1,213	-2,166	-1,068	-1,918	-0,929
D = 0,3	-2,610	-1,341	-2,287	-1,157	-1,976	-0,980	-1,677	-0,810	-1,390	-0,646	-1,115	-0,489	
<i>P-FGM</i> <i>imparfait</i> <i>n=0,2</i>		a = 50		a = 100		a = 150		a = 200		a = 250		a = 300	
		tau	sigma	tau	sigma	tau	sigma	tau	sigma	tau	sigma	tau	sigma
	D = 0	-4,170	-2,254	-3,912	-2,104	-3,664	-1,960	-3,425	-1,821	-3,196	-1,688	-2,976	-1,560
	D = 0,1	-3,871	-2,092	-3,600	-1,934	-3,339	-1,782	-3,088	-1,635	-2,847	-1,495	-2,616	-1,360
D = 0,3	-1,712	0,069	-2,871	-1,533	-2,580	-1,361	-2,300	-1,196	-2,032	-1,036	-1,774	-0,884	

V.4.4. Effet de degré d'homogénéité K :

L'effet de la variation de degré d'homogénéité du matériau P-FGM est illustré dans la figure (V.3), les propriétés matérielles varient selon une loi de puissance qui peut prendre les valeurs ($0 \leq p \leq +\infty$), les grandes valeurs de l'indice P correspondent à un faible pourcentage de la quantité de céramique dans la plaque, autrement dit, l'augmentation de l'indice de loi de puissance P réduit la rigidité de la plaque en raison de la grande quantité de métal par rapport à la quantité de céramique, et par conséquent conduit à une réduction des contraintes d'interface au bord de la plaque, en général les plaques entièrement céramique donnent les plus grandes valeurs.



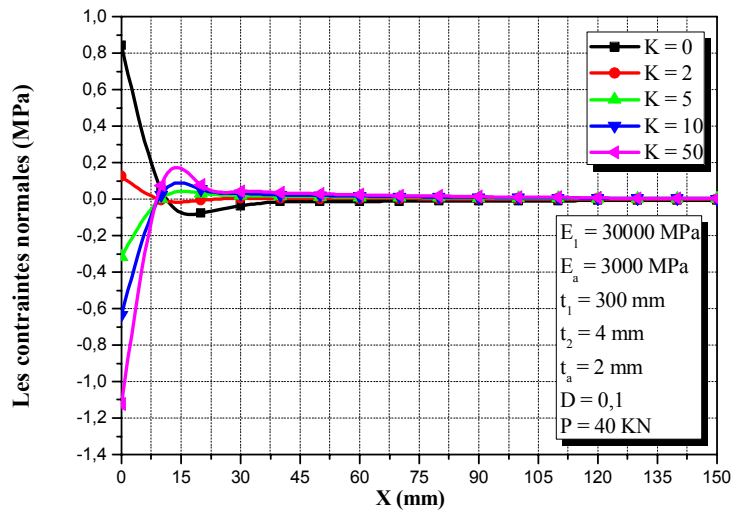


Figure V.3 : L'effet de la variation de degré d'homogénéité de plaque FGM pour une poutre en béton armé endommagée réparée par une plaque FGM sous précontrainte $P = 40 \text{ KN}$.

V.5. Conclusion :

Dans la présente étude, une nouvelle analyse théorique des contraintes d'interfaces a été présentée pour une poutre en béton armé endommagée réparé par une plaque FGM avec force de précontrainte. Comparé aux solutions existantes, le modèle actuel est en général réel.

Après la validation de cette nouvelle méthode avec celle de [Chedad 2016]. Les résultats prouvent qu'il existe une concentration élevée des efforts de cisaillement et de décollement aux extrémités de la plaque précontrainte.

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

- Le maximum des contraintes d'interface (pic) est observé au bord de la plaque puis diminuent, rapidement (brusquement) dans le cas des contraintes normales et progressivement pour les contraintes de cisaillement, pour atteindre toutes les deux la valeur zéro à mi travée.
- Les FGM précontraints doivent être employés pour renforcer les pièces en béton armé, des dispositifs mécaniques d'ancrage devraient être utilisés afin d'éviter la rupture prématurée du système de renforcement et assurer la capacité suffisante d'ancrage aux extrémités des FGM.
- Le maximum des contraintes normales et de cisaillement diminue à mesure que l'épaisseur de l'adhésif augmente ou l'épaisseur de la plaque de composite diminue.
- Prolonger le plus possible la longueur de la plaque de renforcement aux appuis, réduit les contraintes aux bords.
- Lorsque la poutre est plus en plus rigide les contraintes max diminuent par contre, elles augmentent au fur et à mesure que la rigidité de la couche d'adhésive augmente.

Conclusion générale

Cette étude a porté sur le comportement mécanique de poutre en béton armé endommagée, renforcées par une plaque FGM sous précontrainte. Nous avons utilisé les FGM pour réparer et augmenter la capacité portante de ces poutres.

Un des grands avantages de ce procédé de réparation est la possibilité de renforcer la structure sans interrompre l'exploitation de l'ouvrage. On peut tout de même noter un coût de fabrication de FGM encore élevé. Mais cette contrainte économique est moindre par rapport à la reconstruction des ouvrages et à la valeur culturelle des patrimoines historiques.

Le contexte général du présent travail est d'étudier l'influence et l'efficacité des poutres en béton armé endommagées réparées par des plaques FGM sous précontraintes.

La présence d'une plaque FGM sur les surfaces tendues améliore considérablement la résistance ultime en flexion, en cisaillement pour les poutres en béton armé endommagées réparées en diminuant la propagation de fissures.

Afin de compléter les résultats obtenus et de mieux cerner le comportement mécanique des poutres en béton endommagées renforcées par des plaques FGM sous précontrainte, nous envisageons les perspectives suivantes pour la suite de notre recherche :

- Analyse et modélisation des nœuds poteaux-poutres renforcés par matériaux composites sous chargement dynamique.
- Une analyse expérimentale demeure souhaitable afin de développer un code de calcul.
- La fiabilité des structures en béton armé renforcées par FGM.
- Effectuer une étude technico-économique sur les systèmes renforcés ;
- L'intensification de l'expérimentation en lien direct avec le sujet.

Référence bibliographique

[Ait Aneur Meziane M 2008]. Modélisation du décollement des structures hybrides Composite-Béton. Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, Thèse de Doctorat, 2008.

[Bassetti A 2001]., Lamelles précontraintes en fibres de carbone pour le renforcement de ponts rivetés endommagés par fatigue. Doctoral thesis No. 2440, EPF-Lausanne; 2001.

[Benyoucef .S, Tounsi. A, Meftah S.A and Adda Bedia E.A. 2006] Approximate analysis of the interfacial stress concentrations in FRP-RC hybrid beams, Composite Interfaces, vol 13 (17), 561-571, 2006.

[Boch. P Chartier. Huttepain 1986]. M. Tape casting of Al₂O₃/ZrO₂ laminated composites, 1986.

[Calgaro J. et Lacroix R 1997], Maintenance et réparation des ponts, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, p. 11-19, 1997.

[Chedad 2016], Analyse des contraintes d'interface d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque en FGM, mémoire de fin d'étude. Université de Tiaret. 2016.

[Cussin F 1992]. Tôles collées. Précontraintes additionnelles. Annales de l'ITBTP, 501, 85- 88, 1992.

[De Lorenzis L., Micelli F., la Tegola A 2003]. Fibre – Reinforced Polymer for Structural Strengthening : Post – Tensioning of Steel Silos. Structural Engineering International, 2003.

[Deloye F.X, 1989] Identification rapide des ciments sur chantier, Bulletins liaison Laboratoire des ponts et chaussées, Mai-Juin 1989, p. 65-70.

[Ferrier E. 1999], "Comportement de l'interface composite-béton sous des sollicitations de fluage thermostimulé et en fatigue oligocyclique. Application au calcul prévisionnel de la durabilité de poutre BA renforcées". Thèse de doctorat, Université Lyon 1, 1999.

[G.Z. Voyiadjis and P.I.Kattan 1992], A plasticity-damage theory for large deformation of solids-I. Theoretical formulation, Int.J.Engng Sci.30,1089-1108(1992).

[Godart B. 1997], "La réparation du béton dégradé, Maintenance et réparation des ponts". Chapitre 6, Presse de l'école Nationale des Ponts et Chaussées, 1997.

[**Hadji, L., Hassaine Daouadji, T. and Adda Bedia, E.A. 2015**], “A refined exponential shear deformation theory for free vibration of FGM beam with porosities”, *Geomech. Eng., Int. J.*, 9(3), 361-72.

[**Hamelin P 2002**], “Renforcement des ouvrages d’art par matériaux composites”. *Techniques de l’ingénieur, traité plastique et composite*, 2002.

[**Hermite R.L. et al 1967**] .Concrete reinforced with glued plates, RILEM, *International Symposium on synthetic resin in building constructions*, p. 175-203, 1967.

[**J. MAZARS 1984**] Application de la mécanique de l’endommagement au comportement non linéaire et à la rupture de béton de structure. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 1984.

[**J. S. Moya, A.J. Sanchez-Herencia., J. Requena., R.MORENO 1992**], Functionally gradient ceramics by sequential slip casting, *Materials Letters*; 14 (5-6): 333-35, 1992.

[**K. Kokini., Y. Takeuchi,1990**] Multilayer ceramic thermal barrier coatings under transient thermal loads. In *Proceeding of the First International Symposium on Functionally Gradient Materials-FGM’90-Sendai-Japan* ; 31-36, 1990,

[**Khelifa Z. et Fateh N 2009**]. Recherche bibliographique sur les dégradations et les techniques de réparation des ouvrages en béton armé, *Mémoire de fin d’étude*, Université Ibn Khaldoun, Tiaret, 2009.

[**Koizumi M. 1993**], The concept of FGM. *Ceramic Transactions, Functionally Graded Materials*, (1993), 34, 3-10.

[**Lanoos J.1997**], “La maintenance des ponts routiers, Approche économique ”. *Presse de l’école Nationale des Ponts et Chaussées*, 1997

[**Luke S 2001**], The use of carbon fibre plates for the strengthening of two metallic bridges of an historic nature in the UK. *Proceedings of the international conference on FRP composites in civil engineering*, Hong Kong; 2001.

[**Luyckx J 1999**]. *Composites à fibres de carbone dans le génie civil*, *Techniques de l’Ingénieur, traité de construction*, C5 440, 1999.

[**Mohamed I. 2004**], “ Contribution à l’étude du confinement du béton alcali-réactif par matériaux composites carbone époxy”. Thèse de doctorat, Université Lyon 1, 2004.

[**Nordin H 2003**]. Fibre reinforced polymer in civil engineering: flexural strengthening of concrete structures with prestressed near surface mounted CFRP rods. Licentiate thesis Luleå University of Technology, 2003.

[**P. Boch., T. Chartier., M. Huttepain 1987**], Tape casting of Al₂O₃/ZrO₂ laminated composites, J. Am. Ceram. Soc ; 69 (8) : 191-192, 1987.

[**Perrier R et Hamelin P 1996**]., “Ouvrages d’art utilisant des matériaux composites”. IREX, (6), 8-32, 88-114, 1996.

[**R. E. Mistler 1973**], High strength alumina substrates produced by a multiple-layer casting technique, Am. Ceram. Soc. Bull; 52 (11) : 850-854, 1973.

[**RABAH 2013**], Analyse des calculs aux états limites : cas des éléments de structure en béton armé renforcés par collage des composites, mémoire de fin d’étude. Université de Tiaret. 2013.

[**Resse C et Venaut M.1981**] , “Projection des mortiers béton et plâtres”. Techniques et applications bâtiment et TP, 1981.

[**Theillout .J. N 1997**]. Le projet de renforcement ou de réparation des ponts en béton, Presses de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, p. 425-459, 1997.

[**Vénuat M.1989**], “La pratique des ciments mortier et béton”. Moniteur technique, édition du Moniteur, 1989.

[**Williams, J.C 1976**]., « Doctor-Blade Process, in Treatise on Materials Science and Technology », New York : Academic Press, pages : 173-198, 1976.

[**Yoshihisa Uchida 2004**], Properties of functionally graded materials, Manufactured by Progressive Lamination Method for Applications, 39-51 -B, Vol. 39-B, Mar., 2004.

[**Z. Zhong., T. Yu, 2007.**] Analytical solution of cantilever functionally graded beam. Composites Science and Technology ; 67 (3-4) :481-488, 2007