



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

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

Spécialité : Génie Civil

Option : structures

Présenté par :

DRISSI Chahrazed

Sujet du mémoire

***Renforcement en flexion des poutres en T par
collage externe des plaques en matériaux à gradient
de propriétés***

Soutenu publiquement le 05/10/2020 devant le jury composé de :

Mr, Ait Amar Meziane Mohamed	Président
Mr, Benferhat Rabia	Rapporteur
Mme, Ait Yahia Sihem	Examineur
Mme, Kharroubi Lamia	Examineur

PROMOTION: 2019 /2020

R *emerciement*

Je tiens, d'abord à remercier en premier lieu et avant tout, notre Dieu le tout puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience pour effectuer et accomplir ce modeste travail.

En second lieu Je ne pourrais pas commencer mes remerciements sans évoquer la personne qui m'a inspiré et qui m'a encadré tout au long de ce travail, je vous accorde mes chaleureux remerciements et louange revient à vous :

« Monsieur BENFERHAT Rabia »

A travers nos discussions, il m'a apporté une compréhension plus approfondie des diverses étapes et aspects du sujet, je salue aussi son orientation sa souplesse, son ouverture d'esprit et sa bonne humeur qui ont su me laisser une large marge de liberté pour mener à bien ce travail.

Enfin merci aussi à mes parents et ma famille pour leurs contributions, leurs soutiens, invocations et encouragement durant mon chemin d'étude.



« Je dédie ce modeste travail,

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; Maman que j'aime passionnément. Et mon père,

Mes deux frères, Ma sœurs, mes deux aimables nièces, mes neveux,

Toute ma famille

Et mes amies. »

Chahrazed...

Résumé

Les désordres survenus au niveau des structures sont souvent dus aux dégradations des matériaux employés, ou au changement de fonctionnalité afin d'y remédier à cette problématique, il est indispensable de procéder à des méthodes soit de : réhabilitation, de réparation, ou bien le renforcement.

Le renforcement des structures existantes avec des contraintes d'exploitation additionnelles exige un développement de nouvelles méthodes innovantes parmi lesquelles se situe le renforcement par ajout de renforts composites collés.

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnelles, ils apportent de nombreux avantages fonctionnels tel que : légèreté, résistance mécanique élevée, liberté de formes, ainsi qu'une maintenance réduite.

L'objectif de ce travail est de dimensionner une poutre en T_e renforcée par une plaque en matériaux à gradient de propriétés. La poutre en T_e est renforcée uniquement en flexion sur sa face inférieure et soumise à chargement statique. L'effet de plusieurs paramètres tels que la fraction volumique de porosité, l'indice de puissance, la résistance caractéristique du béton ainsi que d'autres paramètres sur la section du renfort sont également étudiés dans ce travail.

Abstract

The deterioration at the structures level are often caused by the degradation of the materials used, or to the change of functionality in order to remedy this problem, it is essential to proceed with methods either of: rehabilitation, repair, or reinforcement.

The reinforcement of existing structures with additional constraints, involves the development of new innovative methods, among which is the reinforcement by adding bonded composite reinforcements.

Composite materials have significant advantages over traditional materials, they provide many functional advantages such as: lightness, high mechanical strength, design freedom, as well as reduced maintenance.

The objective of this work is to dimension a T-beam reinforced by a plate of materials with gradient properties. The T-beam is reinforced only in bending on its underside and subjected to static loading. The effect of several parameters such as the volume fraction of porosity, the power law index , the concrete strength as well as other parameters on the reinforcement section of plate are also studied in this work.

الملخص

غالباً ما يكون التلف التي يحدث على مستوى الهياكل ناتج عن تدهور المواد المستخدمة، أو إلى تغيير الاستخدام من أجل معالجة هذه المشكلة فمن الضروري المضي قدماً عن طريق: إعادة التأهيل، الإصلاح؛ أو التعزيز.

يتضمن تعزيز الهياكل الموجودة مع قيود التشغيل وأحمال إضافية إلى تطوير طرق جديدة ومبتكرة، من بينها التعزيز عن طريق إضافة لوحات مركبة ملصقة.

تتمتع المواد المركبة بمزايا كبيرة مقارنة بالمواد التقليدية، فهي توفر العديد من المزايا الوظيفية مثل: الخفة، والقوة الميكانيكية العالية، وحرية الشكل، فضلاً عن تقليل الصيانة.

الهدف من هذا العمل هو تحديد سمك لوحة الدعم لعارضة على شكل $T\epsilon$ مدعمة بلوحة من المواد متدرجة الخصائص. تم تقوية العارضة على جانبها السفلي فقط وهي معرضة لتحميل ساكن. تم في هذا العمل دراسة تأثير العديد من المعايير مثل حجم الجزئي للمسامات، ومؤشر التدرج، ومقاومة الخرسانة بالإضافة إلى معايير أخرى تم أيضاً دراسة تأثيرها على سمك لوحة الدعم.

TABLE DE MATIERE

Remerciement	
Résumé	
Abstract	
Liste des Figures	
Liste des Tableaux	
Liste des Notations.	
Introduction Générale	02

CHAPITRE I

Pathologies des structures

I.1 Introduction.....	05
I.1.1 Description des pathologies du béton armé	05
I.1.1.1 Pathologies d'origine mécaniques	05
I.1.1.1.1 Fissuration	05
I.1.1.1.2 Les chocs	06
I.1.1.1.3 L'abrasion	06
I.1.2. Pathologies d'origine chimique	06
I.1.2.1 Carbonations du béton	06
I.1.2.2 Corrosion des armateurs	07
I.1.2.3. Réaction sulfuriques	08
I.1.3. Pathologies d'origine physique	09
I.1.3.1 Le retrait	09
I.1.3.2 Gel-Dégel	10
I.2. Autres causes de dégradations des structures	10
I.2.1 Déplacements des coffrages	10
I.2.2. Ségrégation du béton armé	11
I.2.3 Absorption d'eau par béton	11
I.2.4 Contraintes thermiques	11
I.3. Classification générale des pathologies	12
I.4. Conclusion	12

CHAPITRE II.

Les méthodes de réparation et renforcement des structures en béton armé

II.1. Introduction	14
II.2. Réparations des structures en béton armé	14
II.2.1 Définitions	14
II.3. Technique de réparation et renforcement	15
II.3.1 chemisage en béton armé	15
II.3.2 chemisage en acier	15
II.3.3 Béton projeté	16
II.3.3.1 projection par voie sèche	17
II.3.3.2. projection par voie mouillée	17
II.3.4 Intérêt de la technique ..	17
II.3.5. Réalisation	18
II.3.6 Utilisation de résines synthétique	18
II.3.7 Collage de tôles métalliques	18
II.3.7.1 Avantages et inconvénients des tôles	19
II.3.8. Réparations des fissures	20
II.3.9. Précontrainte additionnelle	20
II.3.10. Renforcement avec matériaux composite.....	20
II.3.10.1. Renforcement par polymère renforcé de fibre (FRP	20
II.11. Conclusion	23

CHAPITRE III :

Généralités sur les Matériaux composites

III .1 Introduction	25
III.2 Éléments Constituants d'un matériau composite	26
III.2.1. Le renfort	26
III.2.1.1 Fibre de verre.....	27
III.2.1.2 Fibre de carbone.....	27
III.2.1.3 Fibre d'aramide	28
III.2.1.4 Fibre de bore.....	28

III.2.1.5 Fibre de silice (ou de quartz)	28
III.2.1.6 Fibres de polyéthylène de haut module.....	28
III.2.2. La Matrice	28
III.2.2.1. Les matrices organiques	29
III.2.2.1.1 Les résines thermodurcissables (TD).....	29
III.2.2.1.2 Les résines thermoplastiques (TP).....	29
III.2.2.2.Les matrices minérales	29
III.2.2.2.1 Les matrices métalliques	29
III.2.2.2.2 Les matrices céramiques	29
III.1.3 Les matériaux composites structuraux	30
I.3.1 Les Monocouches.....	30
III.3.2 Les Stratifiés.....	30
III.3.3 Les Sandwichs	31
III.4.Les domaines d'applications des composites	31
III.4.1.Les composites dans la construction civile	31
III.4.2. Les composites dans le secteur médical	31
III.4.3.Les composites dans les produits aéronautiques	32
III.4.4.Les composites dans les produits militaires	32
III.4.5.Les composites dans les produits spatiaux (stellites).....	32
III.5. Les avantages des matériaux composites	33
III.6.Les inconvénients des matériaux composites.....	33
III.7 Conclusion	34

CHAPITRE IV :

Les Matériaux à gradient de propriétés FGM

IV. 1. Introduction	36
IV.2. Historique sur les matériaux FGM	36
IV.3- Concept des matériaux FGM	37
IV.4. Méthodes d'élaboration des FGM.....	38
IV.4.1. Coulage en bande	39
IV.4.2. Coulage séquentiel en barbotine	40
IV.4.3. Compaction sèche des Poudres	40
IV.4.4. Dépôt par électrosphère	41
IV.4.5. Projection plasma	41

IV.4.6. Frittage et infiltration	41
IV.4.7. Frittage Laser Différentiel.....	42
IV.4.8. Dépôt par centrifugation	42
IV.5. Propriétés physiques et mécaniques des FGM	43
IV.5.1. Propriétés physiques	43
IV.5.1.a. Propriétés physiques	43
IV.5.1.b. Propriétés mécaniques.....	43
IV.5.2. Propriétés physiques de la céramique.....	44.
IV.5.2.a. Propriétés physiques	44.
IV.5.2.b. Propriétés mécaniques.....	44
IV.5.2.c. Propriétés des céramiques	44
IV.6. Avantages et Inconvénients des FGMS.....	45
IV.6.1. Avantages des FGM	45
IV.6.2. Inconvénients des FGM	46
IV.7. Domaines d'applications les matériaux.....	46
IV. 8. Lois de mélange et la variation des propriétés matérielles des plaques FGM	47.
IV.8.1. loi de mélange en puissance de la plaque P-FGM	48
IV.8.2. Lois de mélange en sigmoïdes de la plaque S-FGM	49
IV.8. 3. Lois de mélange en exponentielle de la plaque E-FGM	50
IV.9. Conclusion	50

CHAPITRE V:

Dimensionnement des poutres en Té renforcé en flexion par des plaques FGM

V. 1 . Introduction	52
V.2. Analyse théorique	52
V.2.1. Conditions de compatibilités	52
V.2.2. Conditions d'équilibres	53
V.3. Résultats et discussions.....	58
Conclusion générale	75
Références bibliographique	77

Listes des Figures

Chapitre I :

Figure I.1 : Fissuration.	06
Figure I.2 : Carbonatation des bétons.....	07
Figure I.3 : Corrosions des armateurs	08
Figure I.4 : Réaction sulfatique.....	08
Figure I.5: Type de retrait.....	09
Figure I.6 : Effet de Gel-Dégel.	10
Figure I.7 : Classification général des pathologies liées aux structures	12

Chapitre II :

Figure II. 1 : Chemisage en béton arme.	15
Figure II. 2 : Renforcement avec ajout des armateurs	16
Figure II. 3 : Béton projeté par voie sèche et par voie humide.....	17
Figure II. 4 : Application de plats métalliques selon le procédé l'Hermite	19
Figure II.5 : Tôles colées difficulté de manutentions perforées –Brevet feyssient.	19
Figure II. 6 : Renforcement avec un matériaux composites (FRP).	22
Figure II. 7 : a) Renforcement en cisaillement, b) Renforcement en flexion.....	22

Chapitre III :

Figure III.1 : Constituants d'un matériau composite	25
Figure III.2 : Type de Renfort.	26
Figure III.3 : Fibre de verre	27
Figure III.4 : Fibre de carbone.....	27
Figure III.5 : Fibre d'aramide	28
Figure III.6 : Type de matrices	29
Figure.III.7 : Matériau composite monocouche	30
Figure III.8 : Matériau composite stratifié.....	31
Figure III.9 : Matériau composite sandwich.	31

Chapitre IV:

Figure IV.1 : Un type de matériaux FGM céramique métal.....	37
Figure IV.2 : Caractéristique de matériaux FGM.	38
Figure IV.3 : . Principe de la méthode coulage en bande.....	39

Figure IV.4 : Processus de fabrication typique des FGM par la méthode de métallurgie des poudres	40
Figure IV.5 : Fabrication d'une plaque FGM avec la projection plasma.....	41
Figure IV.6 :Disposition du procédé frittage laser différentiel.....	42
Figure IV.7 : Schéma du procédé dépôt par centrifugation.....	42
Figure IV.8 : Les principaux domaines d'application des FGM.	46
Figure IV.9 : Géométrie d'une plaque FGM	48
Figure IV.10 : Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM	49
Figure IV.11 : Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM	50
Figure IV.12 : Variation du module de Young dans une plaque E-FGM.	50

Chapitre V :

Figure V.1 : Géométrie d'une section en T d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par composites FGM	52
Figure V.2 : Diagramme de distribution des contraintes, déformations et des forces d'une poutre rectangulaire en béton armé.	53
Figure V.3 : Géométrie d'une section en T d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par composites FGM.....	58
Figure. V.4 : Effet de porosité sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM poreuse en Al/ZrO ₂ en fonction de l'indice de puissance.	66
Figure. V.5 : Effet de porosité sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM poreuse en Al/Al ₂ O ₃ en fonction de l'indice de puissance	66
Figure . V.6 : Effet du taux de distribution porosité sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM poreuse en Al/ZrO ₂ en fonction de l'indice de puissance.....	67
Figure. V.7 : Effet du taux de distribution porosité sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM poreuse en Al/Al ₂ O ₃ en fonction de l'indice de puissance	67
Figure. V .8 : Effet de la limite élastique de l'acier sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM parfaite en Al/ZrO ₂ en fonction de l'indice de puissance.....	68

Figure .9 : Effet de la limite élastique de l'acier sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM parfaite en Al/Al ₂ O ₃ en fonction de l'indice de puissance.	68
Figure. V10 : Effet de la déformation unitaire du béton sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM parfaite en Al/Al ₂ O ₃ en fonction de l'indice de puissance.	69
Figure .V.11 : Effet de la déformation unitaire du béton sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM parfaite en Al/ZrO ₂ en fonction de l'indice de puissance.	69
Figure V.12 : Effet de la résistance caractéristique du béton sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM parfaite en Al/ZrO ₂ en fonction de l'indice de puissance.	70
Figure V.13 : Effet de la résistance caractéristique du béton sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM parfaite en Al/Al ₂ O ₃ en fonction de l'indice de puissance.	70
Figure V.14 : Effet de la résistance caractéristique du béton sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM parfaite en Al/ZrO ₂ en fonction de l'indice de puissance.	71
Figure V.15 : Effet de la résistance caractéristique du béton sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM parfaite en Al/Al ₂ O ₃ en fonction de l'indice de puissance.	71

Liste des tableaux

Chapitre IV :

Tableau IV.1 : Comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal.....	45
---	----

Chapitre V :

Tableau V.1 : Propriété mécanique des matériaux utilisés	58
Tableau V.2 : caractéristiques et propriétés mécanique des matériaux utilisées.....	59
Tableau V.3 : Comparaison de la section du renfort d'une poutre en Té en béton armé renforcée.....	59
Tableau V.4 : Comparaison de la section du renfort d'une poutre en Té en béton armé renforcée par collage externe des plaques FRP et FGM.....	60
Tableau V.5 : Effet de porosité sur le dimensionnement d'une poutre en Té en béton armé renforcée par collage externe d'une plaque FGM poreuse.....	60
Tableau V.6 : Effet de la résistance caractéristique du béton f_{cu} sur le dimensionnement d'une poutre en Té en béton armé renforcée par collage externe d'une plaque FGM poreuse, $k=5$	61
Tableau V.7 : Effet de limite d'élasticité de l'acier σ_e sur le dimensionnement d'une poutre en Té en béton armé renforcée par collage externe d'une plaque FGM poreuse, $k=5$	62
Tableau V.8 : : Effet de limite d'élasticité de l'acier σ_e sur le dimensionnement d'une poutre en Té en béton armé renforcée par collage externe d'une plaque FGM poreuse, $k=5$. $k=10$	63
Tableau V.9: Effet de la variation de la hauteur du tablier sur le dimensionnement d'une poutre en Té en béton armé renforcée par collage externe d'une plaque FGM poreuse, $a=0.2$, $A_s'=44800\text{mm}^2$	64
Tableau V.10: Effet de la variation de la largeur du tablier sur le dimensionnement d'une poutre Té en béton armé renforcée par collage externe d'une plaque FGM poreuse, $a=0.2$,	65

Liste des Notations

E_c :	Module de Young de la céramique .
E_m :	Module de Young du métal .
$E(z)$:	Module de Young en fonction de z .
k :	Paramètre du matériau.
a :	La longueur de la plaque.
b :	La largeur de la plaque.
h :	L'épaisseur de la plaque
f_{cu} :	La résistance caractéristique de béton .
ϵ_{bc} :	La déformation de béton.
σ_s :	Contrainte d'élasticité limite des armateurs tendus.
E_s :	Module d'élasticité de l'acier .
A_s :	Section des armateurs tendus .
A'_s :	Aire de la section d'aciers comprimé.
A_{FGM} :	Section de composite.
σ_{FGM} :	Contrainte limite du composite.
E_{FGM} :	Module d'élasticité composite .
ϵ_{FGM} :	Déformation du composite .
Z_{FGM} :	Le bras le levier entre la force de compression du béton et la traction des des lamelles en composite.
T_{FGM} :	Contribution du composite a l'effort tranchant .
d_{FGM} :	Hauteur du composite sur la section transversale.
M_u :	Capacité du moment de la section.
M_R :	Moment résiduel.
K_1 et K_2 :	Paramètre caractérisant le béton.
ϵ_s :	Déformation de l'acier tendu .
ϵ'_s :	Déformation de l'acier comprimé.
C_s :	La force de compression d'acier .
C :	La force de compression de béton.
T_s :	La force de traction d'acier .
k :	L'indice puissance .

Abbreviation

FGM : Functionally Graded Materials.

BAEL : Béton armé à état limite.

FRP : Polymère Renforcé de Fibres

Introduction générale

Introduction générale

Le béton a toujours été considéré comme le matériau de construction des ouvrages de génie civil par excellence. La plus grande partie des structures de génie civil est conçue pour durer 100 ans en moyenne. Néanmoins, le béton est un matériau fragile. Lorsqu'une structure est mise en service, elle est susceptible de dégradations, dont l'origine peut être physique, mécanique ou chimique.

Les facteurs mécaniques sont surtout les charges excessives et les chocs. Suite à cette dégradation on trouve un pourcentage important d'ouvrages nécessitant une réparation pour assurer la sécurité des usages avant d'arriver à leur limite de vie.

Plusieurs recherches sont réalisées sur le béton dégradé dont le but est d'évaluer le comportement des ouvrages endommagés et l'évaluation des techniques de réparation.

La réparation d'une structure est une étape nécessaire pour redonner d'une part les sections d'origine de l'acier et du béton, mais aussi pour rétablir les caractéristiques mécaniques des différents éléments concernés. C'est-à-dire de redonner la possibilité à la structure de reprendre au mieux les efforts qui lui sont appliqués.

Il existe plusieurs méthodes de réparation du béton armé ; parmi ces techniques on trouve le chemisage (acier et béton) le béton projeté le collage de tôles métallique , et une nouvelle technique de réparation c'est le renforcement par matériaux composite (Le matériau à gradient fonctionnel FGM).

Dans le domaine du génie civil, les matériaux composites sont utilisés pour le renforcement et la réhabilitation d'éléments structuraux en béton armé, tels que les poutres, les colonnes, les refends et les dalles .

Les matériaux à gradient fonctionnel (FGM) sont apparus en 1984. Ce sont les chercheurs Japonais qui ont introduit pour la première fois cette nouvelle philosophie de matériaux intelligents capables de résister à des gradients de température très importants.

L'objectif de ce travail est le dimensionnement des poutres en T en béton armé, renforcées par un collage externe des plaques FGM.

Le travail présenté dans ce mémoire est composé d'une introduction générale, cinq chapitres et une conclusion générale.

Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur les différentes pathologies et causes de dégradation de structures .

Le deuxième chapitre constitue une étude bibliographique des méthodes de réparations et renforcement des structures en béton armé .

Le troisième chapitre présente une étude bibliographique sur les matériaux composites, leur importance ainsi que les avantages et les inconvénients.

Introduction générale

Le quatrième chapitre présente une étude bibliographique sur les matériaux à gradient de propriétés (Functionally Graded Materials FGM) et leur domaine d'application.

Le cinquième chapitre contient l'analyse de dimensionnement des poutres en T renforcée par une plaque FGM.

Chapitre –I–

Pathologies des structures

I.1. introduction :

Les structures en béton armé sont souvent affaiblies par les pathologies qui les affectent durant leur vie, ceci est dû à l'environnement qui n'a pas été pris en considération.

La pathologie qui affecte le béton, et surtout, ceux qui sont classées dangereuses seront la cause de son effondrement si elles sont ignorées .

Lorsque nous constatons une dégradation sur un ouvrage en service, il est actuellement difficile de dire si celle-ci est apparue pendant la construction, peu après, ou longtemps après. Or , à l'analyse, il apparaît le plus souvent qu'une dégradation n'a pas une cause unique et qu'elle est favorisée par un grand nombre de paramètres, relatifs tout autant à la nature du matériau qu'à la conception de l'ouvrage ou à la technologie de son exécution.

Ce chapitre dresse un panorama de l'essentiel des pathologies affectant les structures en béton armé en les classant en fonction de leur origine chimique , physique ou mécanique ,et donne les différentes causes générales de les dégradation de structures en béton armé.

I.1. Description des pathologies du béton armé:**I.1.1.Pathologies d'origine mécanique :****I.1.1.1. Fissuration :**

La fissuration représente le premier type d'endommagement qui se développe lorsque la structure se trouve chargée mécaniquement. Les fissures peuvent alors s'étendre de la microfissuration a la lézarde. Ces fissures représentent certainement la forme d'altération la plus fréquente. Des formes très diverses peuvent être observées et leurs origines sont nombreuses [1]. Elles peuvent être décrites par une multitude de paramètres.

Il est possible de classer les fissures en trois catégories selon leur évolution :

- Les fissures passives ou mortes, pour les fissures dont les ouvertures ne varient plus dans le temps, quelles que soient les conditions de température, d'hygrométrie ou de sollicitation de l'ouvrage. Cependant, elles sont rares, car les matériaux aux alentours de la fissure varient selon la température, c'est le phénomène de dilatation thermique.
- Les fissures stabilisées, lorsque leur ouverture varie dans le temps en fonction de la température.
- Les fissures actives ou évolutives, lorsque leur ouverture continue à évoluer indépendamment des cycles de température (figure I.1).



Figure I.1 :Fissuration.

I.1-1-2. Les chocs :

Le phénomène de choc peut provenir de :

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

I.1.1.3. L'abrasion :

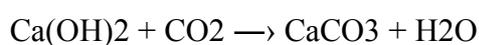
Le phénomène d'abrasion est due généralement à :

- Une circulation intense de l'eau (barrages),
 - Les charges mécaniques répétées (chaussées, dallage industriel),
 - L'action du courant d'eau sur corps immergés ou flottants (piles de ponts, plate forme, etc.)
- [2].

I.1.2. Pathologies d'origine chimique :

I.1.2.1. Carbonations des bétons :

Lors de la prise du béton , il se produit une réaction chimique complexe qui se traduit notamment par la formation d'hydroxyde de chaux Ca(OH)_2 . Cette chaux libérée est présente dans toute la masse du béton. De ce fait, le pH initial du béton est de l'ordre de 12.5; dans le temps, le béton perd environ 50% de l'eau de gâchage qu'il contenait lors de la prise. Cette perte d'eau crée un réseau capillaire à l'intérieur du béton qui favorise la pénétration du dioxyde de carbone CO_2 présent dans l'air et alimenter une réaction chimique appelée: carbonatation



Cette réaction est irréversible précipite l'hydroxyde de calcium sous forme de sel insoluble. Le béton se carbonate et son pH diminue pour atteindre une valeur de 9.

Pour protéger le béton contre la carbonatation il faut le confectionner à faible rapport E/C, pour réduire la porosité du béton, et assurer un enrobage suffisant (qui peut être complété par enduit) (figure I.2) [3].



Figure I.2 : Carbonatation des bétons.

I.1.2.1. Corrosion des armatures :

La corrosion des aciers d'armatures dans le béton est issue d'un processus chimique. Pour que l'acier dans le béton se corrode (formation de rouille), il se trouve dans un milieu favorable :

- Un électrolyte avec une forte conductibilité (ionique).
- Une zone riche en oxygène.

La vitesse de corrosion des barres d'armatures est plus grande en présence de chlorures (l'eau de mer, sel,...) [4]. Les chlorures ont deux effets dans les mécanismes de corrosion :

- Ils diminuent la résistivité de l'électrolyte (le couvert de béton), ce qui facilite le transport des ions d'un site à l'autre.
- Ils permettent l'amorçage plus rapide de la corrosion en dé passivant la couche superficielle (dissolution de la couche passive ou migration des chlorures à travers le film d'oxyde) (figure I.3).



Figure I.3 : Corrosion des armateurs.

I.1.2.3. Réactions sulfuriques :

Ainsi selon certains auteurs, la formation d'étrangéité différée, peut être catégorisée selon l'origine des sulfates responsables de la réaction. En effet, la réaction peut se produire dans le béton durci de deux manières différentes, selon la source des sulfates qui vont engendrer la pathologie (externe ou interne) :

- La réaction sulfurique externe : ce phénomène a pour origine la pénétration dans le béton de sulfates provenant du milieu extérieur (eau de mer, eaux usées, sol...); nommée également DEF by ESA pour « external sulfate attack » [Collepari, 2003], c'est une pathologie commune pour les bétons exposés aux ambiances marines mais aussi aux sols très sulfatés. Ce phénomène étant apparu depuis plusieurs décennies, les nombreuses études publiées ont permis d'atteindre un niveau de compréhension tout à fait correct (figure I.4) [5].



Figure I.4 : Réaction sulfurique interne dans les bétons

La réaction sulfurique interne :

La réaction sulfurique interne : en ce qui concerne ce type de formation d'étrangéité différée, la source des sulfates est interne au béton (présence de sulfates dans le clinker,

granulats pyrétiques) ; elle peut aussi être la conséquence de la déstabilisation de l'étrangéité ; en effet, l'étrangéité soumise à une forte température ($> 70^{\circ} \text{C}$ au cours de son histoire thermique, l'hydratation du béton par exemple) devient moins stable (formation de phases sulfo-aluminates plus stables à stoechiométries sulfates plus faibles). Après retour à des températures plus faibles, cette étrangéité préalablement déstabilisée, se reforme dans le matériau durci sans que la source des sulfates ne soit autre que l'étrangéité dissoute elle-même; cependant, un apport suffisant en eau est indispensable afin de générer un gonflement significatif.[5].

I.1.3. Pathologies d'origine physique :

I.1.3.1. Le retrait :

Le retrait est un phénomène physico-chimique qui existe de façon systématique au sein du béton, et qui se développe sous diverses formes, depuis la prise du béton jusqu'à son vieillissement. Le retrait est un processus relativement complexe. Il peut se décomposer en quatre types différents :

- Le retrait plastique.
- Le retrait thermique .
- Le retrait endogène.
- Le retrait de séchage.

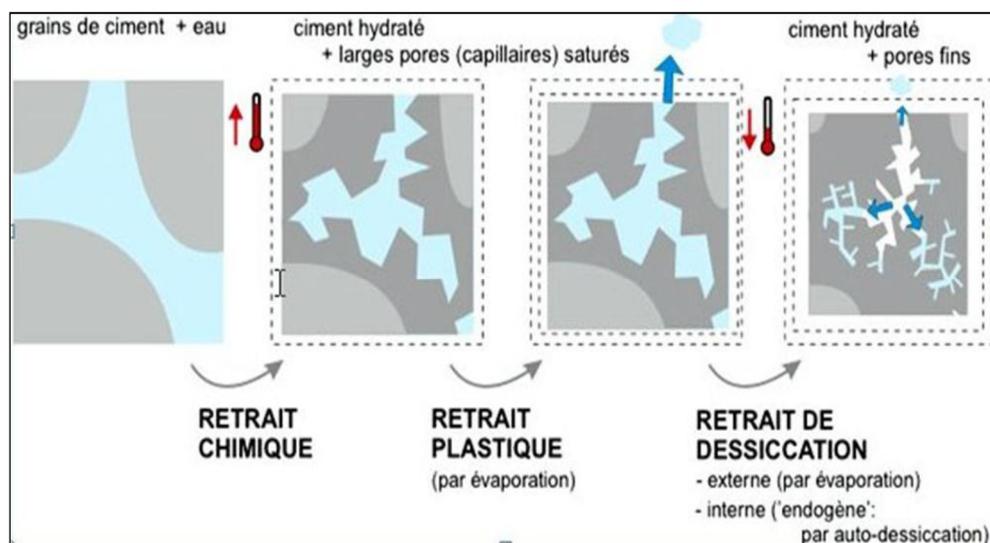


Figure I.5: Les types de retrait.

I.1.3.2. Gel –Dégel :

L'eau est un des rares éléments de la nature à avoir un volume plus important à l'état solide qu'à l'état liquide (pour une masse équivalente). Dans l'eau solide, les molécules s'organisent en mailles moléculaires de forme hexagonale, générant beaucoup plus de vide entre elles : la masse ne change pas quand elle se solidifie mais son volume varie et augmente d'environ 10%. Lorsque l'eau pénètre dans les pores du béton, les forces d'adhésion capillaires abaissent le point de congélation : l'eau contenue dans les pores les plus fins ne se transforme en glace qu'à une température loin au-dessous de 0 °C. La glace se forme donc d'abord dans les pores les plus grands et, ensuite, lors d'un abaissement plus poussé de la température, dans les plus petits.

Néanmoins, l'expansion de l'eau dans la porosité des bétons provoque l'apparition de contraintes pouvant engendrer un écaillage progressif du béton, à partir de la surface .figure (I.6) [6].



Figure I.6 : Effet de Gel-Dégel.

I.2. Autres causes de dégradations des structures :

Les signes apparents extérieurs des désordres d'un ouvrage en béton sont souvent des fissures, des désagrégations et des épaufrâtes. Les causes de ces problèmes sont multiples, les plus fréquemment rencontrées sont :

I.2.1. Déplacements des coffrages :

Les coffrages sont dimensionnés pour résister au poids de béton frais, mais ils sont toujours déformables. La déformation provoquée par le béton frais peut alors entraîner, dans les parties déjà durcies mais encore jeunes, l'apparition de fissures importantes.

Pour empêcher l'apparition de telles fissures il faut :

- Vérifier que le coffrage est bien conçu ;

- Revêtir la surface du bois utilisé pour le coffrage afin d'empêcher l'absorption qui induit un gonflement du bois;
- Vérifier périodiquement les montages et l'exécution pendant le coulage [8].

I.2.2. Ségrégation du béton frais :

Entre la fin du bétonnage et le début de prise se produit un phénomène de sédimentation (tassement) par gravité, les grains lourds en suspension sont attirés vers le bas. L'eau qui reflue (ressuage) entraîne à son tour une partie des grains les plus fins vers la surface de l'élément. Il en résulte, dans la zone inférieure de l'élément, une concentration plus élevée en gros grains et, dans la partie supérieure, une concentration plus forte en pâte de ciment.

Les conséquences du phénomène se traduisent par la cassure du béton frais avec des fissures visibles qui suivent le tracé des armatures les plus proches .

Pour colmater les fissures superficielles, il suffit de différer le réglage des surfaces et de commencer la cure du béton le plutôt possible après sa mise en place ; ce traitement retarde en effet la prise, cela réduit la différence entre la ségrégation en surface et celle en pleine masse [9].

I.2.3. Absorption d'eau par le béton :

On constate souvent que parmi les différentes parties d'un même ouvrage construit avec les mêmes matériaux, certaines sont saines tandis que d'autres sont gravement détériorées. Cela est dû à la différence de quantité d'eau absorbée par le béton.

Il n'est pas possible d'empêcher le gonflement du béton dû à l'augmentation de la teneur en eau. Le remède est soit de tenir compte de la dilatation du béton dans des ouvrages soumis à des cycles de séchage et d'humidification, soit de maintenir le béton humide en le gainant dans une sorte d'épais manchon de bois empêchant la dessiccation de la masse [10].

I.2.4. Contraintes thermiques :

La prise du ciment provoque un dégagement de chaleur. Le béton est mauvais conducteur et dans les pièces massives, cette chaleur s'accumule au cœur, ce qui élève la température et accélère la réaction. De plus, le cœur des pièces refroidit moins vite que la surface. Dans le cas des pièces constituées de parties d'épaisseur différentes, des cisaillements apparaissent dans les zones de transition. En conséquence, il faut limiter les variations brusques d'épaisseur, les angles vifs. Dans certains cas, le choix d'un ciment à chaleur d'hydratation modérée peut, en outre, s'avérer nécessaire. Très souvent une protection thermique même légère diminue nettement les gradients de température [11].

I.3. Classification générale des pathologies :

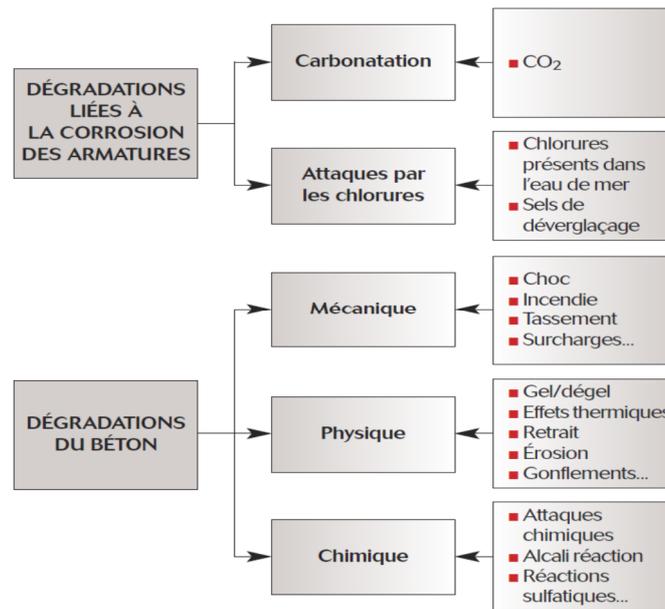


Figure I.7: Classification général des pathologies liées aux structures.[12]

I.4. Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait la connaissance aux différents types de pathologies du béton qui est, dans la majorité des cas, la cause essentielle dans l'effondrement des structures. Comme on a vu les causes et les types (dangereuses et la moins dangereuses) de ces pathologies. Evidemment la dangereuse est prise en considération pour la neutraliser, par conséquent, la moins dangereuse, devient dangereuse, si elle n'est pas prise en compte pour des éventuelles réparations plus tard.

Chapitre –II–

Les méthodes de réparation et renforcement
des structures en béton armé

II.1. Introduction :

Les travaux de remise en état ou de renforcement des structures porteuses sont quelque fois, nécessaires, soit pour remédier à la vétusté des constructions ou à leur dégradation, soit pour prévenir, ou réparer, les méfaits de travaux effectués au voisinage immédiat des immeubles, soit encore pour permettre certaines transformations : surélévation d'immeuble, création d'ascenseurs, augmentation des surcharges des planches etc

Comme cela a été montré précédemment, le béton se dégrade sous l'action de nombreux facteurs. Compte tenu du coût des structures de génie civil, il est important de pouvoir les réparer afin d'augmenter leur durée de vie. 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 du renforcement ou de la réparation consiste en l'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 du renforcement), ou bien si la résistance a diminué par suite de dégradation (problème de la réparation.) [12].

Ce chapitre dresse les différences méthodes de renforcement et réparation des structures en béton armé.

II.2. Réparation des structures en béton armé :

II.2.1. Définitions :

Réparation:

La réparation d'une structure est une opération qui consiste à lui restituer, par des travaux appropriés, un niveau de service perdu, la baisse du niveau de service peut résulter de toutes sortes de causes ; les plus fréquentes sont la dégradation progressive des matériaux (agressions atmosphériques, modification des propriétés des matériaux), l'utilisation intensive (effet de répétition des charges) voire abusive (utilisation au-delà des charges prévues), les accidents et sinistres (incendies, choc ,séisme, ...) [13].

Renforcement:

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier (augmentation de la ductilité, de la résistance) d'une construction pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre des sollicitations dont il n'a pas été tenu compte dans les calculs [14]. Un renforcement peut être associé à une réparation.

II.3. Technique de réparation et renforcement :

II.3.1. Chemisage en béton armé :

Le chemisage en béton armé consiste en une augmentation considérable des sections (Figure II.13) par la mise en œuvre d'un ferrailage additionnel à l'ancien élément, et d'un nouveau béton d'enrobage ; pour favoriser l'accrochage, ce dernier sera mis en œuvre après la confection du coffrage [15].

a) Les avantages :

- Technique peu coûteuse du fait des matériaux utilisés .
- Main d'œuvre peu qualifiée.

b) Les inconvénients :

- Augmentation considérable des sections donc du poids de la structure, donc des charges sismiques .
- Les éléments sont plus encombrants et moins esthétiques.
- Transport des matériaux .
- Nécessite de coffrages .
- Mise en œuvre souvent difficile ,du fait du manque d'espace [1].



Figure II.1 : Chemisage en béton armé.

II.3.2. chemises en acier :

Le renforcement des poteaux de sections circulaires ou rectangulaires avec des chemises en acier permet d'améliorer considérablement la résistance sismique des poteaux.

L'efficacité des chemises en acier a été clairement démontrée, à la fois par les recherches expérimentales et par des observations sur le terrain effectuées durant le séisme de Northridge en 1994. Plusieurs ponts dont les piles étaient renforcées avec des chemises en acier se trouvaient dans des régions ayant subi des secousses intenses qui ont atteint une

accélération maximale de 0,25 g. Aucun de ces piles ne semble avoir subi de dommages importants (Chai, 1996).

Toutefois, cette technique est coûteuse et exigeante en main-d'œuvre. Compte tenu de la grande efficacité de cette technique et de son coût, les chemises en acier pourraient éventuellement être utilisées dans les installations industrielles possédant un nombre restreint de poteaux nécessitant un renforcement. Cependant, dans le cas des bâtiments types où plusieurs poteaux doivent être renforcés, cette technique s'avère trop onéreuse.

Les chemises en acier rectangulaires destinées au renforcement des poteaux rectangulaires améliorent aussi la résistance et la ductilité des poteaux. Toutefois, les résultats des recherches ont démontré que les chemises rectangulaires sont moins efficaces que les chemises elliptiques.[16].

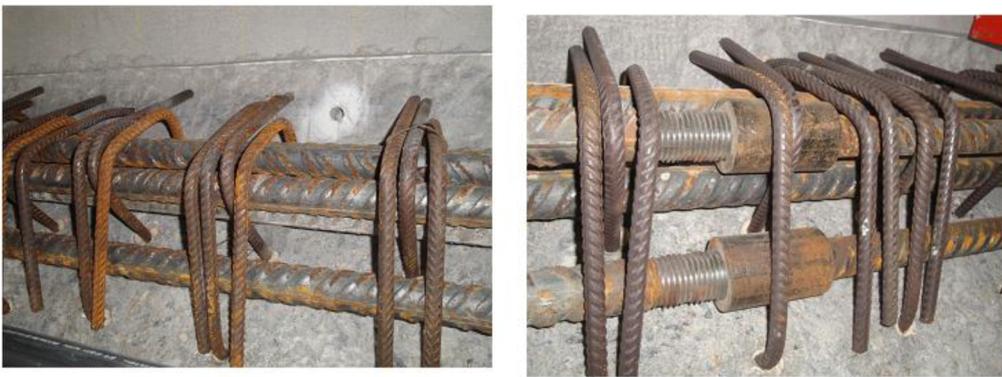


Figure II.2 : renforcement avec ajout de armateurs.

II.3.3. Béton projeté :

La réparation à l'aide de béton projeté consiste à piquer les zones dégradées et à projeter sur l'ensemble de l'ouvrage du béton par voie humide.

Cette surépaisseur de béton est moins poreuse, plus durable et peu sensible aux attaques par les chlorures.

Le béton projeté n'étant pas encore carbonaté, il stoppe l'évolution de la carbonatation, le temps d'être lui-même complètement carbonaté. Il empêche également la pénétration d'humidité grâce à sa faible porosité, ce qui protège les armatures de la corrosion.

Il est nécessaire d'appliquer des inhibiteurs de protections sur la structure sous peine d'avoir une corrosion [17].

Le béton projeté est un béton mis en œuvre à l'aide d'une lance, par projection sur une paroi sous l'impulsion d'un jet d'air comprimé.

La technique consiste à :

- Malaxer et homogénéiser les constituants (ciment, granulats, adjuvants, fibres...) à l'état secoué en incorporant l'eau de gâchage.
- Transporter le mélange par des canalisations avec l'aide d'une pompe .
- Projeter le matériau sur le support à revêtir grâce à un jet d'air comprimé.

Il existe deux techniques de projection : par voie sèche ou par voie mouillée.

La différence entre les deux techniques est liée à la manière dont l'eau de gâchage du béton est introduite (soit lors du malaxage du béton, soit lors de l'application du béton).

II.3.3.1 Projection par voie sèche :

Le mélange sec (granulats, ciment et éventuellement accélérateur de prise et adjuvants) est fabriqué dans un malaxeur puis propulsé par de l'air comprimé vers la lance de projection.

Cette lance est associée à une lance de projection d'eau (et éventuellement d'accélérateur de prise sous forme liquide) (Figure II.1)

III.3.3.2. Projection par voie mouillée :

Le mélange comprenant l'eau est stocké après malaxage dans une trémie. Il est ensuite pompé jusqu'à la lance de projection et projeté grâce à l'air comprimé. (Figure.2) .

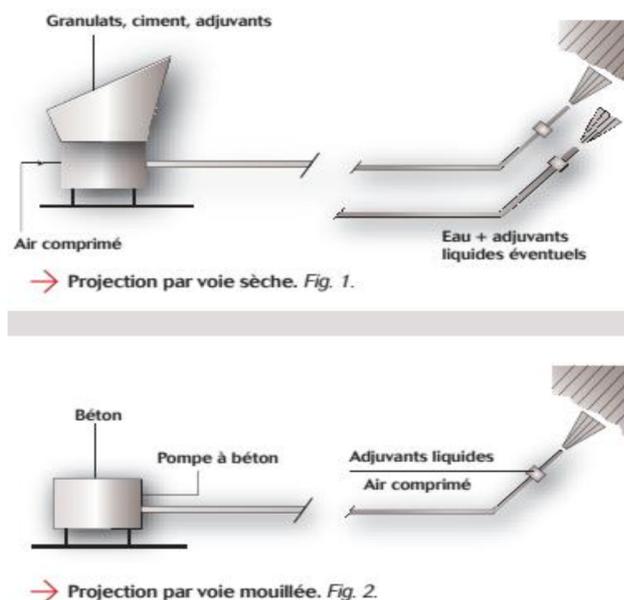


Figure II.3 : Béton projeté par voie sèche et par voie humide

II.3.4. Intérêt de la technique :

La technique du béton projeté permet de réaliser des couches de béton de faible épaisseur qui épousent le support et y adhèrent parfaitement.

Elle est utilisée en travaux neufs ou en réparation d'ouvrages anciens (réparations locales, confortements d'ouvrages, renforcements de structures...).

Le choix de la technique de projection est fonction :

- De l'importance du chantier. La technique par voie sèche qui offre une grande souplesse d'utilisation est privilégiée pour des chantiers de faible importance ou nécessitant des arrêts fréquents .
- De la nature des travaux à effectuer.
- Des cadences de réalisation souhaitées : la technique par voie humide permet des de production élevées .
- Des performances mécaniques à obtenir : la technique par voie sèche permet d'obtenir des résistances élevées.
- L'adjonction de fibres (dosage 35 à 50 kg/m³) offre au béton projeté des propriétés complémentaires, fonction du type de fibres : limitation des effets du retrait, amélioration des résistances mécaniques, meilleure cohésion du béton à l'état frais.

II.3.5.Réalisation :

Les opérations de bétonnage comprennent la succession des étapes suivantes :

- Préparation du support.
- Mise en place des armatures : treillis soudés, barres [7].
- Projection du béton par passes successives.

II.3.6.Utilisation de résines synthétiques :

Les résines synthétiques sont souvent employées pour arrêter la corrosion, protéger les aciers et reconstituer le béton. Les plus utilisées et les plus stables sont les résines époxydes, livrées généralement sous forme de deux composants séparés (base + durcisseur). Elles sont utilisées :

- Dans le cas de ragréage, pour réaliser le mortier de ragréage.
- Dans le cas de restructuration, pour constituer la couche d'accrochage du béton de restructuration, celui-ci pouvant alors être obtenu à partir d'un liant hydraulique [8].

II.3.7.Collage de tôles métalliques a extérieures :

Cette technique est utilisée en cas de fortes augmentations des surcharges de service. Il faut d'abord débarrasser le béton de la laitance par sablage. Les armatures sont constituées par des plaques de tôle de 3mm d'épaisseur, sablées et protégées d'un époxyde primaire. Après encollage, les plaques sont pressées sur le support. Les plaques doivent ensuite être protégées contre la corrosion et contre l'incendie (Figure II. 4).

Cette technique, délicate, ne doit être mise en œuvre que par une entreprise spécialisée [18].

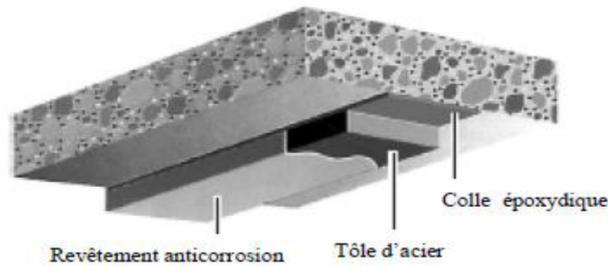


Figure II.4 : Application de plats métalliques selon le procédé l'Hermitte

II.3.7.1 .Avantages et inconvénients des tôles collées : [19]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">▪ il n'exige que des interventions mineures sur la structure ;▪ il est d'un emploi souple ;▪ Les renforts sont peu	<ul style="list-style-type: none">▪ Sensibilité de l'acier à l'oxydation (il demande donc une protection et un entretien soigné) ;▪ impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles, même sous faible épaisseur (solicitation le long d'une face) ;▪ nécessité d'une préparation spécifique de la surface à traiter (la raideur des tôles nécessite une surface parfaitement plane pour assurer l'uniformité de l'épaisseur de l'adhésif) ;▪ nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine de collage .▪ impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masse manipulées trop importantes), ce qui limite d'autant les possibilités de réparation (Figure II.5).



Figure II.5 : Tôles collées difficulté de manutention perforées -Brevet Freyssinet[19].

II.3.8. Réparation des fissures :

Les fissures fonctionnelles ne nécessitent aucun traitement dans la mesure où les sollicitations restent dans les limites prise en compte dans les calculs et que le fonctionnement réel des ouvrages est cohérent avec la modélisation initialement retenue.

Si tel n'est pas le cas, il faut d'abord consolider ou modifier les éléments concernés de façon à obtenir un fonctionnement correct [17].

Les fissures accidentelles doivent en général être traitées, surtout si leur ouverture dépasse les limites indiquées précédemment. Les choix du procédé de traitement dépend principalement de l'objectif recherché, éviter la corrosion des armatures, empêcher l'eau de traverser une paroi, corriger un défaut d'aspect extérieur, etc....

Les principales solutions envisageables sont :

- Pontage ou revêtement protecteur en surface .
- Rebouchage de fissures.
- Injection des fissures.

II.3.9. Précontrainte additionnelle :

Il peut être envisagé d'appliquer à des ouvrages existants des efforts de précontrainte en vue soit de leur redonner leur état de service initial , soit de leur donner un nouvel état de service.

La conception et le calcul doivent être en conformité avec les règlements en vigueur (BAEL).

L'étude doit porter sur l'influence de l'effet des efforts appliqués localement sur des structures non conçues à l'origine pour les recevoir.

Mieux vaut confier une telle étude à des spécialistes.[1] .

II.3.10. Renforcement avec un matériaux composite :

II.3.10.1. Renforcement par Polymère Renforcé de Fibres (PRF) :

Un polymère renforcé de fibres PRF(Fibre Reinforced Polymer ; FRP) est un matériau composite qui se compose d'un arrangement de matrice et de fibres continues ou discontinues. De façon générale, les fibres de carbone ou de verre sont noyées dans une matrice polymère. La résistance mécanique de la matrice est beaucoup plus faible que celle des fibres. De par l'orientation privilégiée des fibres le matériau composite est en général anisotrope. Ses caractéristiques mécaniques et chimiques, et sa densité très favorable en font un matériau très efficace comparé au métal.

Dans le domaine de la construction, les matériaux composites sont souvent utilisés dans le renforcement et la réparation de structures en béton armé comme les poutres, voiles, colonnes,... notamment dans les bâtiments, ponts...

Les matrices utilisées sont généralement d'origine pétrolière.

On peut citer notamment les résines polyester thermodurcissable, les résines époxydes, les résines vinylester ou encore les résines thermoplastiques (polyamides...).

Au niveau des fibres, les fibres de verre, de carbone ou d'aramide sont les plus courantes.

La fabrication des différents types de fibre demande une haute technicité avec un coût relativement élevé et à un fort impact au niveau environnemental.

De plus, ce type de composite en fin de vie devient un déchet non dégradable et non renouvelable.

L'utilisation de fibres naturelles en substitution des fibres minérales devient par voie de conséquence une alternative intéressante vis-à-vis des fibres de carbone, verre... A l'heure actuelle elles sont développées et utilisées dans plusieurs domaines comme : l'automobile, l'aéronautique, le nautisme...

Dans la construction, le renforcement de structures avec fibres naturelles est à ces débuts avec essentiellement une utilisation avec des fibres courtes. Les études sur les composites naturels à fibres longues sont quant à elles beaucoup plus limitées.

Néanmoins les demandes fortes vis-à-vis de l'écologie poussent à développer des procédés utilisant des matériaux moins nocifs pour l'environnement.[20]

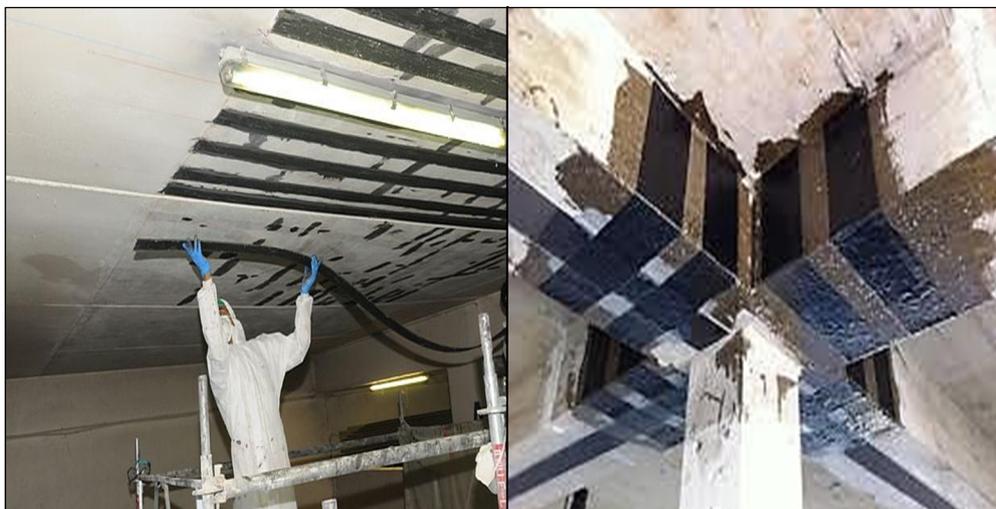


Figure II.6 : Renforcement avec un matériau composite (FRP).

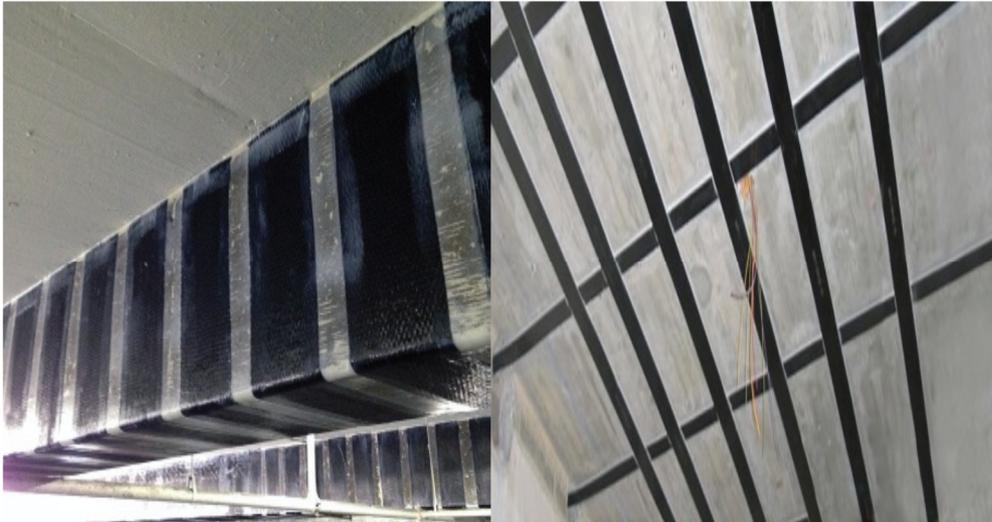


Figure II.7 : a) renforcement en cisaillement ; b) renforcement en flexion.

II.11. Conclusion :

Le renforcement d'une structure en béton consiste à améliorer les caractéristiques mécaniques des éléments qui la composent, de manière à ce qu'elle offre une meilleure solidité aussi bien en état de service qu'en état de résistances ultimes.

Ce chapitre présente les méthodes les plus utilisées dans le domaine de renforcement et réparation des structures. Il s'agit principalement des techniques de renfort , ou bien une modification de la section structurelle et la plus récente qui utilise des matériaux composites en tant que renfort externe.

Chapitre –III–

Généralités sur les Matériaux composites

III.1.Introduction :

Un matériau est une substance, une matière destinée à être mise en forme des différents objets peuvent être fabriqué avec du même matériau et un objet peut être fabriqué avec des matériaux différents.

On peut classer les matériaux en cinq grandes familles : les métaux, les plastique, les céramiques, les organiques et les composites

Les composites seront étudié dans ce chapitre. Le principal intérêt de l'utilisation des composites provient de ses excellentes caractéristiques spécifiques (module divisé par la masse volumique).

Les matériaux composites sont constitués d'un ou plusieurs matériaux combinés dans des états solides avec des propriétés physiques et chimiques distinctes.

Ces matériaux offrent une excellente combinaison de propriétés encore meilleure que peut proposer les matériaux premiers individuellement et ils sont également plus léger.

On appelle maintenant de façon courante, matériaux composites, des arrangements de renforts (fibres et /ou particules) noyés dans une matrice (résines), dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible, que celle des renforts.

La matrice assure la cohésion du matériau et l'orientation et la tenue des fibres. . Elle permet aussi de transmettre à ces fibres, qui assurent l'ossature du matériau, les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces.

Les renforts, sous forme de fibres, contribuent à l'amélioration de la résistance mécanique et de la rigidité de la pièce obtenue, dans laquelle ils sont incorporés.

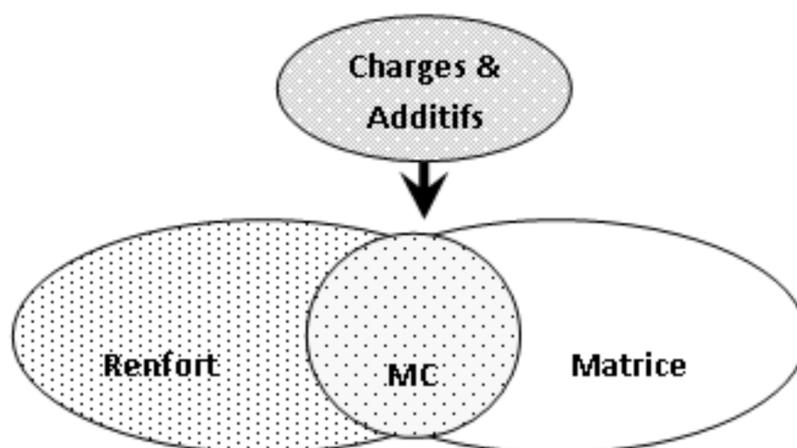


Figure III.1 :Constituants d'un matériau composite.

III.2. Éléments Constituants d'un Matériau Composite :

Les performances mécaniques des composites fibreux sont directement liées aux caractéristiques mécaniques de leurs constituants: la matrice, les fibres mais aussi l'interface fibre-matrice.

- La rigidité d'un composite est assurée principalement par les **fibres** qui possèdent des caractéristiques mécaniques beaucoup plus élevées que la matrice.
- Quant à la **matrice**, elle permet de donner la forme géométrique de la structure, d'assurer la cohésion de l'ensemble des fibres et de les protéger contre le milieu ambiant.

Mais son rôle principal est de transférer les efforts mécaniques d'une fibre à l'autre.

- L'**interface** est la zone de transition entre les fibres et la matrice.

Elle possède des caractéristiques chimiques et mécaniques différentes de celles des fibres et de la matrice.

Une large gamme de fibres et de matrices est disponible, mais dans ce qui suit, nous présenterons quelques-uns des matériaux les plus couramment utilisés.[21].

III.2.1. Le renfort :

Les renforts ou les fibres contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet directif. Ils sont caractérisés par :

- La nature de la fibre, minérale ou organique.
- L'architecture du renfort.[22].

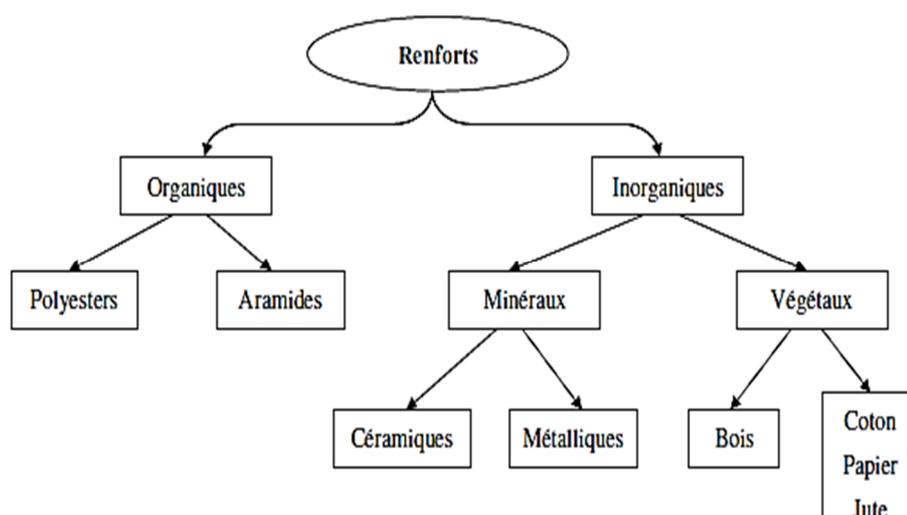


Figure III.2. :Type de renfort.

III.2.1.1. Fibre de Verre :

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion .Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore).

On distingue trois types de fibres :

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).[23].



Figure III.3 : Fibre de verre

III.2.1.2. Fibre de Carbone :

C'est la fibre la plus utilisées dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

- Fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- Fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800à 2000 °C.

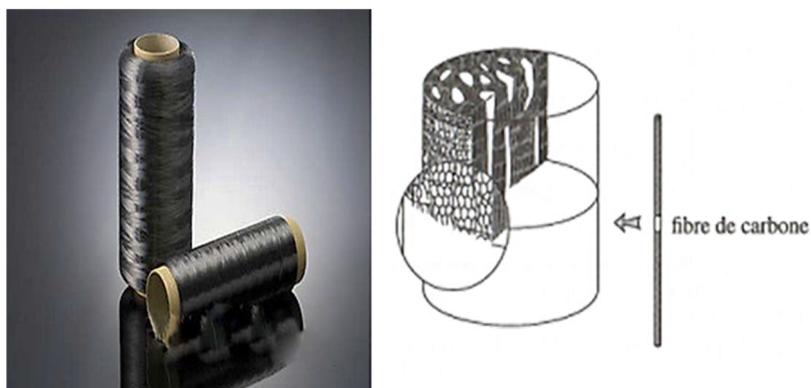


Figure III.4 : Fibre de Carbone.

III.2.1.3. Fibre d'Aramide :

Appelée aussi KEVLAR, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

- Les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;
- La fibre haute module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.

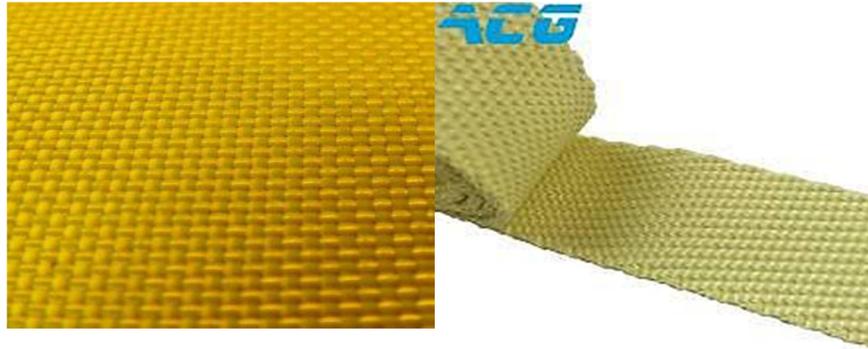


Figure III.5 :Fibre d'aramide.

III.2.1.4. Fibre de Bore :

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.

III.2.1.5. Fibre de Silice (ou de quartz) :

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée.

III.2.1.6. Fibres de Polyéthylène de Haut Module :

Ces fibres ont une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité.

Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester.[23].

III.2.2. La Matrice :

Le rôle des matrices est de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur. Les matrices doivent présenter une bonne compatibilité avec les fibres. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées.

Les matrices peuvent être de nature métallique, céramiques ou polymère.[24]

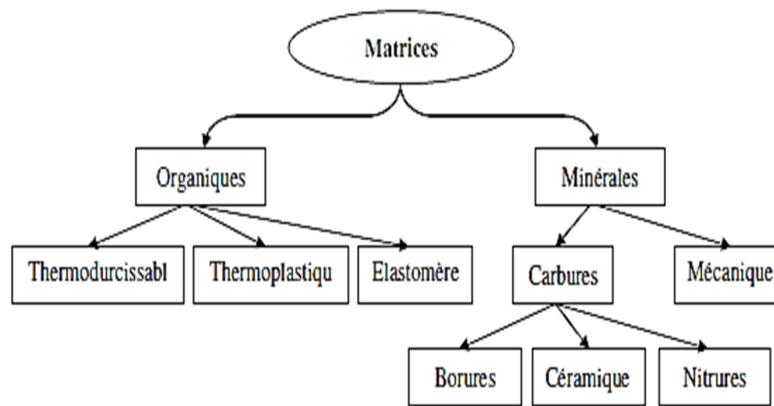


Figure III.6 :Types de Matrices

III.2.2.1. Les matrices organique :

III .2.2.1.1. Les Résines Thermodurcissables (TD) :

Les résines thermodurcissables sont, en général, associées avec des fibres longues. Les polymères thermodurcissables sont mis en forme par chauffage lors d'une transformation irréversible. Les principales résines thermodurcissables sont les polyesters, très largement utilisés, les résines époxydes et les résines phénoliques. Les composites à matrice thermodurcissables représentent environ 70 % des composites transformés en Europe.

III .2.2.1.2. Les Résines Thermoplastiques (TP) :

Les polymères thermoplastiques durcissent au cours du refroidissement. Le processus de transformation chimique qui les fabrique est réversible. Les principales résines thermoplastiques utilisées dans les composites sont le polypropylène, les polyamides et le polyéther-éther-cétone.

III.2.2.2. Les Matrices Minérales :

III.2.2.2.1. Les Matrices Métalliques :

Pour les applications à très hautes températures, on fait appel aux composites à matrice métallique (C.M.M.) jusqu'à 600 °C. Les métaux ou alliages métalliques, utilisées dans la fabrication des (C.M.M.), sont généralement choisis en fonction de leurs propriétés spécifiques dans l'état non renforcé ainsi, l'aluminium, le titane et le magnésium sont les métaux les plus couramment utiliser, les (C.M.M.) présentent de bonnes caractéristiques mécaniques spécifiques, une bonne résistance en températures et au chocs thermiques.

III.2.2.2.2. Les Matrices Céramiques :

Elles sont utilisées dans des pièces qui doivent subir sans dommages à très hautes températures (tuiles de protection thermique, brûleurs). Le point faible des céramiques, à

savoir leur très faible résistance à la rupture en traction. Dans ce type de composite, le renfort est généralement constitué de fibres longues en carbone, en silice ou en carbure de silicium.

Ces matériaux sont développés essentiellement dans le domaine aérospatial en tant que structure thermique en raison de leur haute résistance thermomécanique spécifique[24].

III.3. Les Matériaux Composites Structuraux :

La rigidité d'un composite est conditionnée par le nombre et l'empilement des couches, leur nature, leur orientation, leur séquence d'empilement, etc.

Généralement les matériaux composites structuraux sont classés en trois catégories :

- Les monocouches .
- Les stratifiés .
- Les sandwiches.

III.3.1. Les Monocouches :

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes. Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère .Taux de déséquilibre très grand.[25]

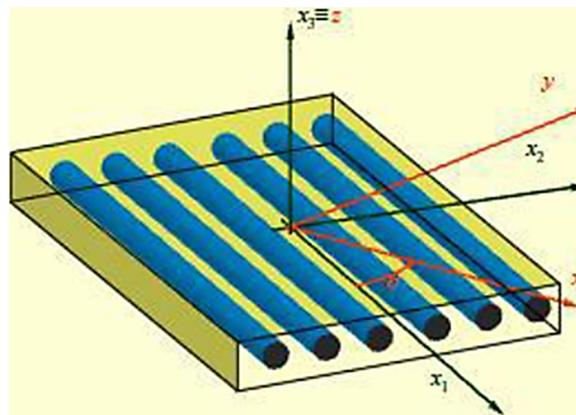


Figure III.7 :Matériau composite monocouche

III.3.2 Les Stratifiés :

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié.

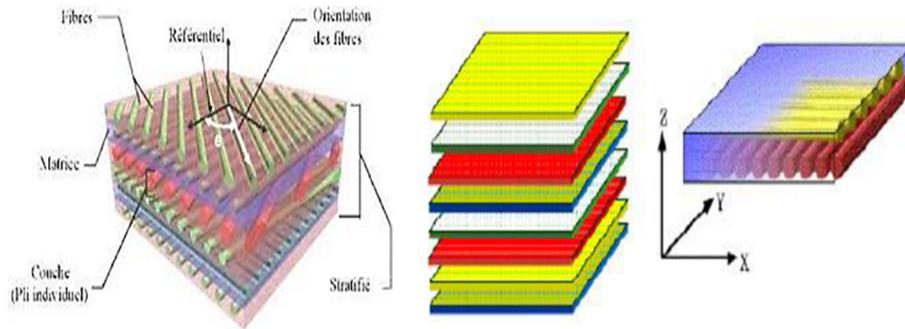


Figure III.8 :Matériau composite stratifié

III.3.3 Les Sandwichs :

Une structure sandwich résulte de l'assemblage par collage ou soudeur de deux revêtement ou peaux minces sur une âme ou cœur plus léger qui maintient leur écartement (Figure III.9) . Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion c'est un excellent isolant thermique.[25]

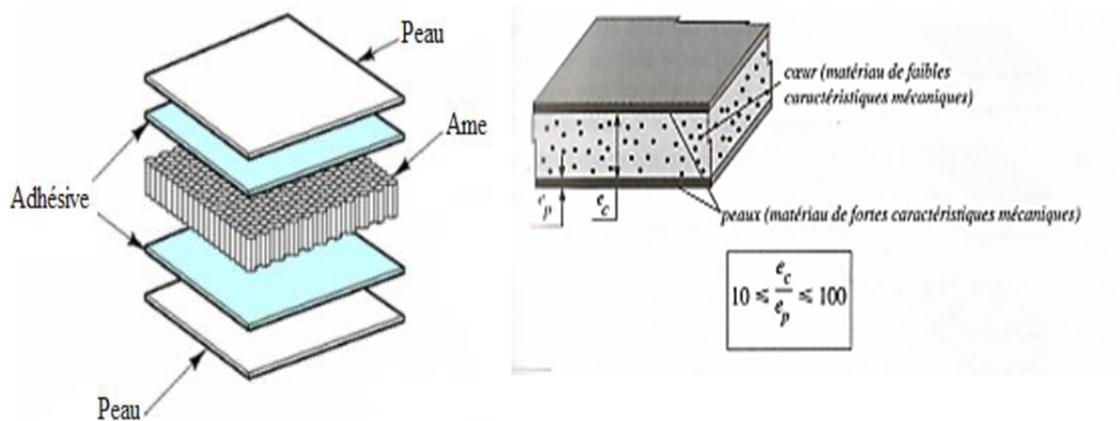


Figure III.9 :Matériau composite sandwich.

III.4. Les domaines d'application des composites :

III.4.1. Les composites dans la construction civile :

L'utilisation des composites dans la construction civile est un nouveau créneau, qui commence à intéresser nos bâtisseurs. Le nombre de dégâts causés par les séismes à travers le monde a poussé les chercheurs à s'intéresser aux composites. L'handicap majeur de l'utilisation des matériaux composites dans la construction civile, reste leur coût, qui est encore excessif. L'utilisation des composites renforcés de fibres de carbone, en complément des composites à fibre de verre (TD et TP). [26].

Les composites apportent au bâtiment la souplesse des formes, la résistance aux contraintes climatiques, et les composites renforcés de fibres de carbone la résistance aux séismes .L'utilisation des composites dans le bâtiment ne pourra se développer que si les prescriptions techniques actuelles sont mieux adaptées à leur spécificité.

III.4.2. Les composites dans le secteur médical :

Les composites TD et TP ont investi récemment le secteur médical et de la sécurité, comme ils ont investi auparavant les autres secteurs. Il s'agit surtout des composites hautes performances, à matrice époxy et fibres de carbone, ou à matrice thermoplastique et fibres longues de verre ou de carbone d'autre part. L'utilisation des composites permet d'augmenter la fiabilité et la précision des instruments grâce à une meilleure résistance aux chocs, une grande rigidité et une bonne résistance à la corrosion (prothèses, brancards).

III.4.3. Les composites dans les produits aéronautiques :

La principale motivation dans l'utilisation des matériaux composites pour la réalisation des structures aéronautiques est essentiellement le gain de masse apporté tout en conservant d'excellentes caractéristiques mécaniques. Les matériaux composites présentent aussi un quasi insensibilité à la fatigue, en comparaison aux matériaux métalliques qui nécessitent une maintenance et un suivi régulier de la propagation des fissures. Ils ne sont pas aussi sujets à la corrosion, mais ils nécessitent une bonne isolation électrique lors des assemblages avec des pièces en alliages légers entre le composite et le métal pour éviter la corrosion galvanique de l'aluminium (si la fibre de renfort est en carbone par exemple). Les techniques de fabrication utilisées permettent l'obtention de formes complexes directement par moulage avec possibilité de réaliser en une seule pièce un ensemble, qui réalisé en métallique, nécessite plusieurs sous éléments. Ceci permet de réduire les coûts d'assemblage de façon importante.

III.4.4. Les composites dans les produits militaires :

Pour les produits militaires (missiles), le premier avantage, c'est la performance des matériaux composites, ensuite l'utilisation des composites sur les ailettes de guidage de missiles permet de garder une bonne maîtrise de la trajectoire jusqu'à la cible finale à cause de l'échauffement cinétique provoqué par le frottement de sur la structure des ailettes de missile, en fin de trajectoire les ailettes en alliage d'aluminium peuvent foudre dans certaines conditions et le missiles poursuit sa trajectoire sans contrôle ce qui entraîne une perte précis de tir.

III.4.5. Les composites dans les produits spatiaux (satellites)

Les déformations de la structure peuvent avoir une origine thermique avec des expositions en température pouvant varier entre -180°C lorsque le satellite est dans l'ombre et $+160^{\circ}\text{C}$ lorsque le satellite est exposé au soleil. De plus, sur la même structure, entre la face éclairée et la face à l'ombre, le gradient de température peut être important. Les structures en matériaux composites à matrice organique peuvent, avec une orientation optimisée des différentes couches constituant la structure, présenter globalement un coefficient de dilatation thermique proche de zéro pour l'ensemble de la structure.

La stabilité géométrique de la structure aussi apportée par la raideur globale de la structure.

L'utilisation des fibres de carbone à très haut module sur les composites permet de répondre à cette préoccupation. Le principal inconvénient des composites à matrices organiques pour les applications satellites est sans aucun doute la reprise d'humidité, pendant les opérations d'assemblage et pendant le stockage avant lancement. [23]

III.5. Les avantages des matériaux composites :

- L'usage des matériaux composites ne cesse de croître dans différents domaines: automobile, naval, pétrolier, aéronautique et aérospatial. En effet, ces matériaux présentent de nombreux avantages
- Importantes rigidités et résistances spécifiques afin de concevoir des structures hautes Performances tout en réalisant des gains de masse par rapport aux solutions métalliques .Faible sensibilité à la fatigue.
- Faible sensibilité à la corrosion
- Possibilité de réaliser des structures de formes complexes réduisant ainsi les coûts d'assemblages.
- Possibilité de fabriquer des matériaux avec des propriétés particulières (coefficient Poisson négatif, dilatation quasi-nulle...).
- Possibilité de dimensionner les structures avec des propriétés élevées uniquement dans les axes de surcharge..

III.6. Les inconvénients matériaux composites :

Toutefois, un certain nombre de désavantages sont associés aux matériaux composites :

- Coût important du passage matériau métallique à matériau composite, prenant en compte le coût matériau (des constituants) et le coût associé au procédé de fabrication.
- Dispersion matériau plus importante que les matériaux métalliques induisant un surcoût des campagnes de qualification matériau due aux nombres de répétitions d'essais imposées.

- Forte sensibilité aux singularités géométriques (de type trou, entaille...) constituant des maillons faibles au sein de la structure.
- Faible tenue à l'impact pour les stratifiés d'unidirectionnels ou de tissés 2D, ce qui constitue en revanche l'atout majeur des tissés 3D.
- Sensibilité à l'environnement des matrices organiques entraînant une perte de propriétés
- Mécaniques notables après vieillissement thermique ou hydrique ...
- Faible conductivité électrique des composites à matrice organique, ce qui constitue un problème important pour la résistance aux impacts de foudres des fuselages composites [27].

III.7. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les matériaux composite et leur utilisations dans le domaine du génie civil .

Les matériaux composites ont une grande flexibilité en s'adaptant aux formes géométriques les plus complexes des éléments renforcés et pour leur légèreté par rapport aux aciers ainsi que leur résistance mécanique plus importante que les autres moyens de renforcements aussi ces avantages, mécanique et physico-chimique permettent l'utilisation des matériaux composites comme méthode de renforcement et de réhabilitation des structures en béton armé.

Chapitre –IV–

Les Matériaux à gradient de propriétés FGM

IV. 1. Introduction:

La plupart des « FGM » sont constitués d'un mélange de céramique et de métal. Cette composition est variée d'une surface riche en céramique à une surface riche en métal avec une variation désirée des fractions volumiques de ces deux matériaux entre les deux surfaces.

IV.2. Historique sur les matériaux FGM:

En 1985, un grand nombre de chercheurs des institutions publiques et de l'industrie ont uni leurs efforts pour créer ce nouveau type de matériau. Principalement pour être à même de construire l'enveloppe extérieure d'une navette intercontinentale commerciale. Le problème principal à résoudre était le flux de la chaleur énorme frappant la majorité des surfaces qui sont exposées à la friction par l'air lors de la période de rentrée d'une navette spatiale dans l'atmosphère terrestre, et en même temps protéger l'intérieur contre une surchauffement. En 1987, le gouvernement Japonais a lancé un vaste projet intitulé « la recherche sur la technologie de base pour développement de matériaux à gradient de propriétés et l'étude de la relaxation des contraintes thermiques ». L'intérêt du projet est de développer des matériaux présentant des structures utilisées comme barrière thermique dans les programmes aérospatiaux.

Les matériaux constituant les parois des engins spatiaux sont appelés à travailler à des températures de surface de 1800°C ainsi qu'à un gradient de température de l'ordre de 1300°C. A cette année-là, aucun matériau industriel n'était connu pour supporter de telles sollicitations thermomécaniques [28].

Trois caractéristiques sont à considérer pour la conception de tels matériaux :

- Résistance thermique et résistance à l'oxydation à haute température de la couche superficielle du matériau. Ténacité du matériau coté basse température. Relaxation effective de la contrainte thermique le long du matériau [29]. L'idée originale des FGM a été proposée pour élaborer un nouveau composite profitant à la fois des propriétés des céramiques (Coté haute température) et des métaux (Coté basse température).

A la fin de la première étape (1987-1989), les chercheurs avaient réussi à fabriquer des petites pièces expérimentales (1-10 mm d'épaisseur et 30mm de diamètre) pouvant résister à des températures maximales de 2000K (température de surface) et à un gradient de température de 1000K.

Dans la seconde étape (1990-1991), le but était de réaliser des pièces de tailles plus grandes et de formes plus complexes par rapport à celles réalisées dans la première étape. Pendant les années 90, non seulement les champs d'application des FGM s'est développé pour les matériaux de structure fonctionnant à haute température.

On trouve une littérature très importante sur l'utilisation de ce matériau. Cependant, l'utilisation des structures en FGM dans les environnements avec de grands changements de température exige la connaissance des déformations.

IV.3- Concept des matériaux FGM :

Le matériau à gradient fonctionnel a été introduit la première fois dans le laboratoire national d'aérospatial du Japon en 1984 par M. Niino et ses collègues à Sendai. L'idée est de réaliser des matériaux utilisés comme barrière thermique dans les structures spatiales et les réacteurs à fusion. Les FGM peuvent être utilisés pour différentes applications, telles que les enduits des barrières thermiques pour les moteurs en céramique, turbines à gaz, couches minces optiques, etc..Généralement, les FGM sont des matériaux constitués de plusieurs couches contenant des composants différents tels que les céramiques et les métaux. Ils sont donc des composites présentant des caractéristiques macroscopiquement hétérogènes. Le changement continu dans la composition et donc dans la microstructure du matériau distingue les FGM des matériaux composites conventionnels. Il en résulte un gradient qui déterminera les propriétés des FGM dans certains cas. En conséquence, les FGM possèdent un certain nombre d'avantages excédant que les composés stratifiés, y compris une réduction potentielle de contraintes membranaires et transversales à travers l'épaisseur, tendance d'efforts, absente ou sévèrement réduite de décollement, un effort résiduel amélioré, propriétés thermiques augmentées, une dureté plus élevée de rupture, et réduit facteurs d'intensité d'effort. Un certain nombre de revues traitant de divers aspects de FGM ont été édités (par exemple, Suresh et Mortensen 1998 ;Minamoto et autres 1999 ; Birman et Byrd 2007).[30].

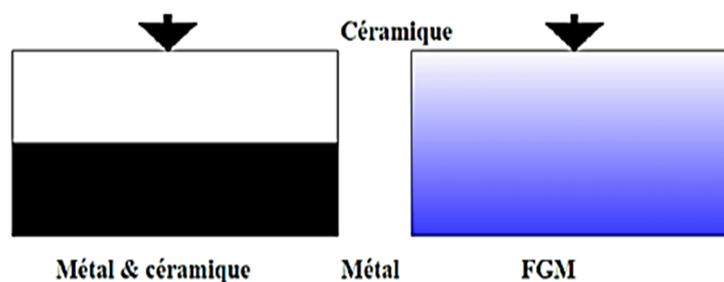


Figure IV.1 : Un type de matériaux FGM céramique métal [31]

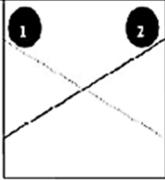
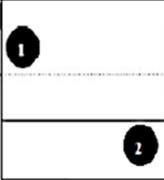
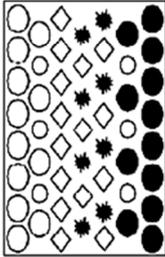
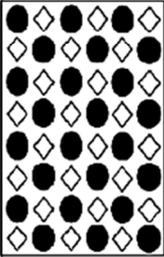
Propriété	<p>1 Résistance mécanique</p> <p>2 Conductivité thermique</p>		
Structure	<p>Eléments constitutifs:</p> <p>Céramique ○</p> <p>Mét ●</p> <p>Microporosi ○</p> <p>Fil ✱</p>		
Matériau	exemple	FGM	NON-FGM

Figure IV.2 : Caractéristique de matériaux FGM [31].

IV.4. Méthodes d’élaboration des FGM:

L’obtention des qualités désirées nécessite de plus l’intervention de techniques sophistiquées et subtiles comme l’utilisation de lasers, de plasmas, l’implantation ionique, de dépôts en phase vapeurs, etc. Les procédés de fabrication d’un matériau à gradient peuvent habituellement être divisés en construisant la structure dans un espace hétérogène (mélange graduel) et la transformation de cette structure en matériau en bloc (solidification).

Les processus de mélange graduel peuvent être classés suivant ses constituants, l’homogénéisation et la ségrégation. Les procédés élémentaires sont basés sur la fabrication par étape de structure en matériaux graduels précurseurs ou poudres. Les avancés en technologie d’automatisation durant les dernières décennies ont rendu des processus élémentaires de progression technologiquement et économiquement durables. Dans la procédure d’homogénéisation qui traite une interface pointue entre deux matériaux est convertie dans un gradient par transport matériel. Les procédés d’homogénéisation et de ségrégation produisent un gradient continu, mais ont des limitations au sujet des types de gradients qui peuvent être produits.

Habituellement, le séchage et la solidification suivent les étapes du mélange graduel.

Le besoin de ces processus de consolidation doit adapter aux FGM :

- Des conditions de procédure choisie pour ne pas altérer ou détruire le gradient en mode non contrôlé.
- Prêter attention a tout rétrécissement inégal du FGM pendant la consolidation.

Ces dernières années, les travaux menés au laboratoire ont permis de développer une méthode originale pour élaborer des composites à gradient continu de composition. Cette méthode est basée sur une technique de co-sédimentation de poudres en milieu proportionnelle à la densité du matériau et au carré du diamètre de particule. En contrôlant et en adaptant les répartitions granulométriques de chaque poudre, il est possible d'obtenir différents gradient de concentration dans le dépôt formé à l'issue de sédimentation. Il existe de nombreuses méthodes d'élaboration des FGM et qui sont citées ci-dessous :

IV.4.1. Coulage en bande :

Le coulage en bande à couleuses 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 couche minces et régulière. Les produits obtenus sont des feuillets avec des épaisseurs contrôlées. Après un raffermissement de la pâte, les feuillets sont démoulés et ensuite découpés.

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. Les liants (Plastifiants et défoulant) doivent être totalement dégagés pendant le délainage.

Le procédé de coulage en bande est largement utilisé pour réaliser des matériaux composites laminaires suivant deux méthodes :

- Réalisation directe de bandes multicouches grâce à un système de lames multiples c'est le cas des tri-couches élaborées par Mistler.
- Empilement des couches élaborées séparément dont la cohésion est ensuite assurée par une étape de thermo-compression.

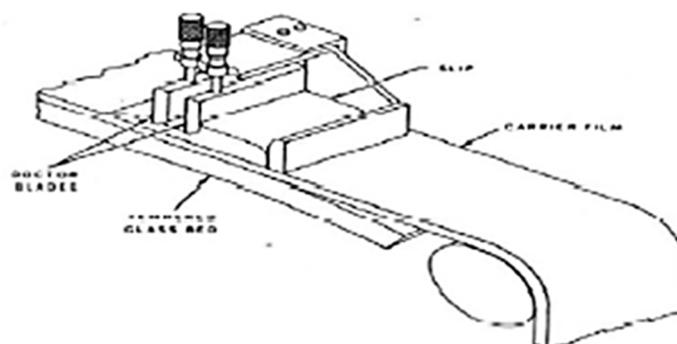


Figure . IV.3 : Principe de la méthode coulage en bande.

IV .4.2. Coulage séquentiel en barbotine:

Le coulage en Barbotine 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 effectué en deux étapes essentielles :

- Formation du tesson ou « prise ».
- Consolidation du tesson « raffermissement ».

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

- Du pouvoir de succion de la plate (coulage classique [32]).
- 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 fermé.
- Ce procédé est successivement reproduit pour les autres couches.

IV.4.3. 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 délitage. La densification sera enfin l'étape finale. 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 de façon industrielle.

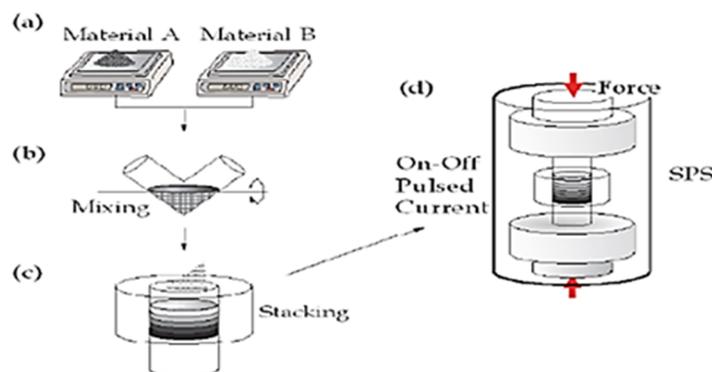


Figure IV.4 : Processus de fabrication typique des FGM par la méthode de métallurgie des poudres .

IV.4.4. Dépôt par électrosphère:

Le dépôt par électrosphère est un procédé dans lequel une suspension colloïdale stable est placée dans une cellule contenant deux électrodes, le dépôt se fait par le mouvement des particules chargées au sein de la solution vers la cathode ou l'anode selon le signe de la charge des particules due à un champ électrique [33].

IV.4.5. Projection plasma :

Un gaz soumis à une forte température (par exemple celle d'un arc électrique) se transforme en un état ionisé (plasma). Cette transformation est accompagnée d'un dégagement de chaleur important. Si une particule de céramique se trouve dans cet environnement, elle se fond totalement ou superficiellement ce qui permet de situer sur un substrat. La projection plasma des particules des divers matériaux est devenue une méthode très utilisée pour fabriquer les FGM l'équipement est relativement simple, le rendement élevé du dépôt des particules sur des substrats à géométrie compliquée ; les performances des surfaces en fonctionnement et la compatibilité des céramiques avec les métaux sont les avantages essentiels de cette technique [34].

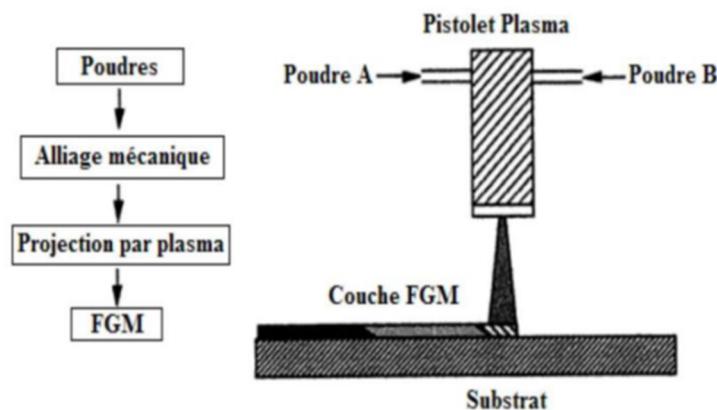


Figure IV.5 : Fabrication d'une plaque FGM avec la projection plasma

IV.4.6. Frittage et infiltration:

Cette technique est constituée de deux étapes et convient à la fabrication d'un composite à gradient de fonction composé de deux matériaux dont les températures de fusion sont très différentes :

- La première étape est de fabriquer une matrice frittée du matériau à haute température de fusion avec un gradient de porosité.

• La seconde étape est de remplir ces porosités avec le deuxième matériau fondu par infiltration. Le résultat est excellent pour la diminution de la contrainte thermique [35]. Cette technique peut être généralement appliquée pour plusieurs combinaisons de matériaux qui sont chimiquement inertes et qui ont des points de fusion bien différents les uns par rapport aux autres.

IV.4.7. Frittage Laser Différentiel :

Le rayonnement thermique du laser permet le contrôle de la température et la focalisation du point à chauffer. La différence de l'intensité de l'irradiation sur différents points du matériau, provoque un frittage différentiel le long de la pièce, ce qui résulte en des microstructures différentes, dépendant de la position du point irradié. (Figure IV.6.) montre schématiquement la disposition du procédé utilisé par les autres .

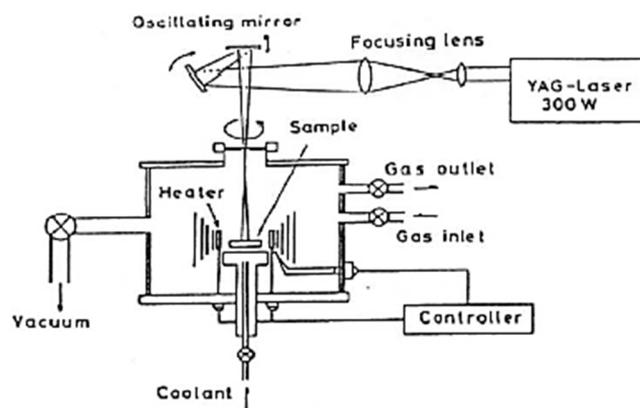


Figure IV.6 :Disposition du procédé frittage laser différentiel.

IV.4.8. Dépôt par centrifugation:

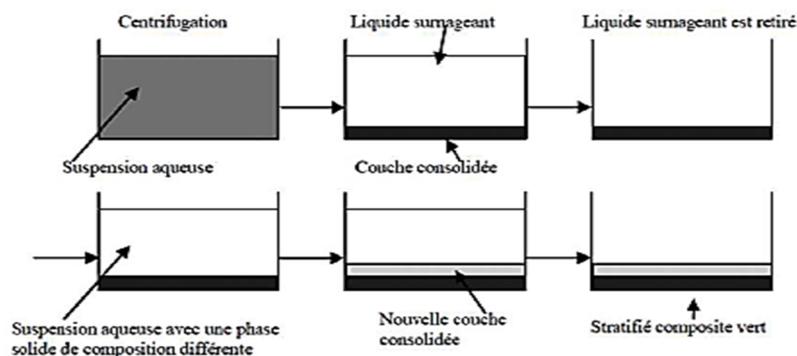


Figure IV.7 :Schéma du procédé dépôt par centrifugation

La technique consiste à verser une suspension colloïdale relativement diluée dans des flacons cylindriques, le tout est soumis à une centrifugation. La sédimentation s'opère et le liquide surnageant est retiré.

Ce procédé est répété pour obtenir des multicouches(Figure IV.7) .

IV.5. Propriétés physiques et mécaniques des FGM:

IV.5.1. Propriétés physiques de l'aluminium:

Définition: L'Aluminium est un métal blanc qui après polissage peut devenir réfléchissant.

IV.5.1.a. Propriétés physiques: L'Aluminium à une température de fusion relativement basse d'environ 660°. Il en résulte une facilité de fusion qui présente un avantage certain pour les opérations de fonderie. L'Aluminium est très ductile, on peut aisément le mettre en forme. La masse volumique de l'Aluminium est de 2700 kg/m³L'utilisation de l'Aluminium s'impose donc dans. Les domaines aéronautiques et du transport.

IV.5.1.b. Propriétés mécaniques: Les propriétés mécaniques des métaux présentent un grand intérêt dans la vie quotidienne, elles peuvent être classées en deux groupes :

- Celles qui se rapportent à la résistance mécanique du métal :
- Résistance à la traction.
- Résistance à la pénétration (dureté).
- Celles qui concernent les modifications de forme que le métal peut subir sans se briser :
- La malléabilité (mises en feuilles).
- La ductilité (mise en fils).
- Propriétés des alliages d'aluminium: L'Aluminium à pour propriétés une:
- Température de travail élevée.
- Très bonne résistance à la corrosion.
- Légèreté.
- Très bonnes solidité, dureté et rigidité.
- Bon rapport force/poids
- Bonne conductivité thermique.
- Conductivité électrique élevée.
- Bonnes caractéristiques de finition.
- Entièrement recyclable.

Résistance à la corrosion: Grace à la couche d'oxyde qui se forme en surface, les Alliages d'Aluminium résistent à la corrosion. On peut rendre cette couche protectrice d'oxyde plus épaisse par galvanisation. L'Aluminium et ses alliages peuvent être utilisés sans protection supplémentaire comme revêtement extérieur de bâtiments. Par contre dans les milieux corrosifs, les alliages d'Aluminium peuvent subir les effets de la corrosion. Des piqures, de la corrosion sous contrainte, de la fatigue corrosion, voire de la corrosion généralisées peuvent se développer. Pour des conditions données, la sévérité de l'attaque dépend de l'alliage utilisé et de son état.

IV.5.2. Propriétés physiques de la céramique:

Définition : La céramique résulte des terres et des roches broyées (matériaux géologiques) ou bien d'une argile qui sera modelée puis cuite sous haute température (transformation irréversible) ce qui fait perdre au matériau sa plasticité donc il ne peut plus se réhydrater.

IV.5.2.a. Propriétés physiques:

La céramique a une facilité de fusion qui présente un avantage certain pour les opérations de fonderie. La masse volumique de la céramique est de 2700 kg/m^3 .

L'utilisation de la céramique s'impose dans les domaines de l'habitat et du design, l'industrie céramique et métallurgique, aéronautique et spatial, médicale et dans les revêtements.

IV.5.2.b. Propriétés mécaniques:

Les propriétés mécaniques du céramique dépendent des:

- Matières première employées.
- Méthodes de fabrication qui fixent les microstructures finales et déterminent la répartition des différentes phases en présence.

IV.5.2.c. Propriétés des céramiques:

Les propriétés de la céramique sont :

- Un module de YOUNG élevé (Liaisons, covalente, ioniques).
- Une dureté élevée (Abrasif, outils de coupe, surfaces de frottement qui doivent résister à l'usure, résistance mécanique élevée, bonne tenue à chaud, rigidité élevée).
- Une très bonne résistance à la compression non à la traction (Résistance à la compression =200Mpa).[33]

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

Tableau IV.1: Comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal[33]

IV.6. Avantages et Inconvénients des FGMS :

Les matériaux fonctionnellement gradués présentent des avantages et des inconvénient

IV.6.1. Avantages des FGM :

Outre l'accomplissement de son objectif principal, c'est à dire de fournir les différents requis des propriétés en divers points et des surfaces du futur produit qui, pourrait être réalisé par un simple revêtement ; et beaucoup d'autres soulignent divers avantages supplémentaires de la FGM. Ils énumèrent certains avantages qui en résultent principalement de la non-existence d'une interface forte FGM, tels que:

- Diminuer les contraintes thermiques causées par les différences de coefficients de dilatation thermique des matériaux utilisés.
- Absence d'une interface nette devrait conduire à un contrôle d'ensemble mieux des contraintes.
- Meilleure cohésion entre différents matériaux, par exemple un métal et une céramique.
- Extension de la région fonctionnelle avant d'atteindre la valeur limite de la déformation plastique.
- Suppression de délaminage.
- Augmentation de la ténacité à la rupture.
- Élimination des singularités des contraintes à divers endroits, tels que les surfaces libres, des coins, des racines de fissures, etc....

IV.6.2. Inconvénients des FGM :

Le principe obstacle à une application plus large de la FGM est leur fabrication compliquée en raison de l'inadéquation des propriétés différentes, par exemple, la température de fusion, des affinités différentes pour divers autres éléments, la taille des particules, la morphologie, un exemple type est un mélange d'un métal avec la température de fusion (T_1) et une céramique avec une température de fusion (T_2). Dans la plupart des cas, un tel couple est habituellement ($T_1 \ll T_2$). Puis, si la température de fabrication est d'environ (T_1), la céramique est encore non fondue et la structure finale contient des particules de céramique non fondue dans une matrice métallique. Dans de nombreux cas, une telle structure présente une grande porosité et une petite adhérence entre les différents composants et son application générale est limitée. Cependant, pour des applications spéciales, la présence de particules très dures (carbures) dans une matrice solide peut être souhaitable.

IV.7. Domaines d'applications les matériaux FGM :

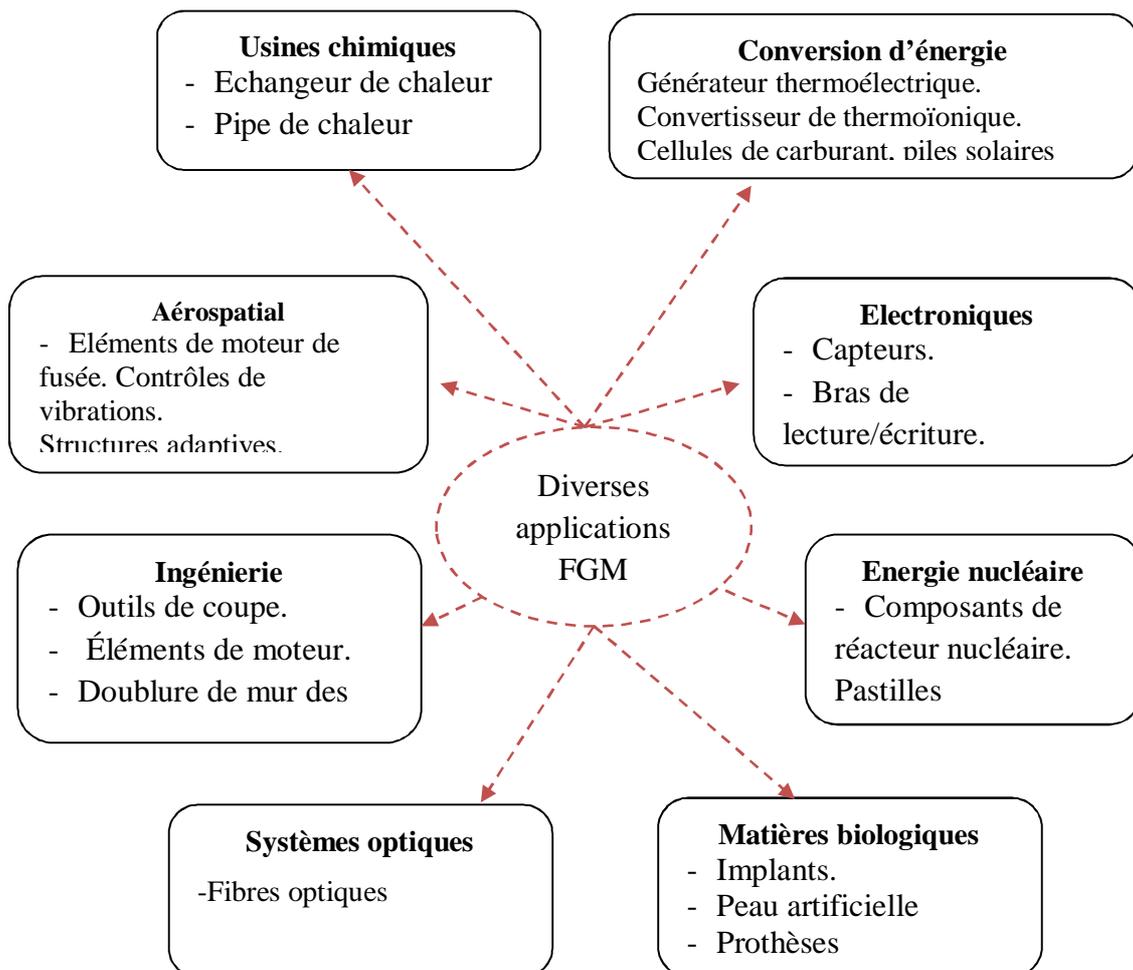


Figure IV.8 : Les principaux domaines d'application des FGM

Les matériaux à gradient est applicable dans des nombreux domaines, comme il est illustré dans la Figure IV.8. Il a été initialement conçu pour l'industrie de l'aéronautique où les FGM ont fourni deux propriétés contradictoires telles que la conductivité thermique et d'isolation thermique dans un matériau. Actuellement elles permettent la production des matériaux légers, forts et durables, et elles sont applicables dans un large intervalle des domaines tels que les matériaux de construction, matériaux de conversion d'énergie, nucléaire et semi-conducteurs[39].

IV.8. Lois de mélange et la variation des propriétés matérielles des plaques FGM :

Un matériau à gradient de propriétés est un matériau fonctionnel. La combinaison de matériaux distincts permet d'améliorer les propriétés électriques, magnétiques, mécaniques, thermiques du système global.

Les propriétés mécaniques sont intimement liées à la microstructure sollicitée. La nature des phases, leurs pourcentages, leurs morphologies sont des paramètres qui vont jouer sur les propriétés mécaniques. Différentes voies peuvent être utilisées pour modéliser le comportement de matériaux multi-phases : Loi de mélange ou modélisation numérique de la microstructure [43]. Différentes lois de mélange existent et découlent des travaux menés sur composites. Nous citons à titre d'exemple : le modèle de Voight, Reuss, Hirsch-Dougill, Les approches de Tsai-Pagano ou de Popovics qui sont des cas particuliers du modèle de Hirsch-Dougill, Modèle de Hashin-Shtrikman,..etc

La dépendance des propriétés de la position se traduit par la prise en compte de la loi des mélanges correspondant au modèle de Voigt [40].

$$P = \sum_{i=1}^n P_i V_i \quad (\text{IV.1})$$

Avec P_i et V_i sont respectivement la propriété mécanique et la fraction volumique du constituant i , avec:

$$\sum_{i=1}^n V_i = 1 \quad (\text{IV.2})$$

Dans la pratique, la plupart des structures FGM sont à deux constituants : de la céramique et du métal inoxydable en général. Dans ce cas, la loi de Voigt se réduit à :

$$P = P_1 V_1 + P_2 V_2 \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

$$V_1+V_2=1 \quad (IV.4)$$

Un FGM peut être définie par la variation des fractions de volume. La plupart des chercheurs emploient la fonction de puissance, la fonction exponentielle, ou la fonction sigmoïde pour décrire les fractions de volume. Les liaisons entre les particules doivent être assez dures à l'intérieur pour résister à la rupture, et également assez dures à l'extérieur pour empêcher l'usure.

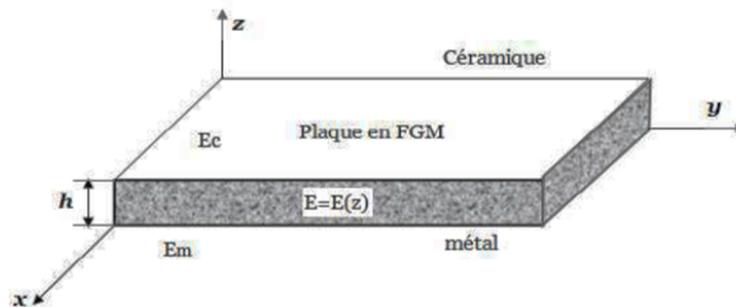


Figure . VI.9 : Géométrie d'une plaque FGM [43]

Les coordonnées x et y définissent le plan de la plaque, tandis que l'axe z est perpendiculaire à la surface moyenne de la plaque et dans la direction de l'épaisseur. Les propriétés du matériau dont le module de Young et le coefficient de Poisson sur les faces supérieures et inférieures sont différentes. Ils varient de façon continue, suivant l'épaisseur (l'axe z) soit :

$$E = E(z) \text{ et } \nu = \nu(z).$$

Indiquent que l'effet du coefficient de poisson sur les déformations est négligeable comparativement à celui du module de Young. Par conséquent, le coefficient de Poisson peut être supposé comme constant. Cependant, Le module de Young dans la direction de l'épaisseur de la plaque FGM varie en fonction de la loi de puissance (P-FGM), la fonction exponentielle (E-FGM) ou avec la fonction sigmoïde (S-FGM) [41].

IV.8.1.loi de mélange en puissance de la plaque P-FGM :

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

$$V(z) = \left(\frac{z+h/2}{h}\right)^k \quad (IV.5)$$

Où « k » est un paramètre matériels et « h » est l'épaisseur de la plaque. Une fois la fraction

volumique locale « $V(z)$ » a été définie, les propriétés matérielles d'une plaque P-FGM peuvent être déterminées par la loi des mélanges [42]:

$$E(z) = E_m + (E_c - E_m)V(z) \tag{IV.6}$$

E_m et E_c sont respectivement les modules de Young de la surface inférieure $z = -h/2$.

Et de la surface supérieure $z = +h/2$ de la plaque FGM. La variation du module de Young dans la direction d'épaisseur de la plaque P-FGM est représentée sur la (Figure IV.2). Il apparaît clairement que la fraction volumique change rapidement près de surface inférieure pour « $K < 1$ », et augmente rapidement près de la surface supérieure pour « $K > 1$ ».

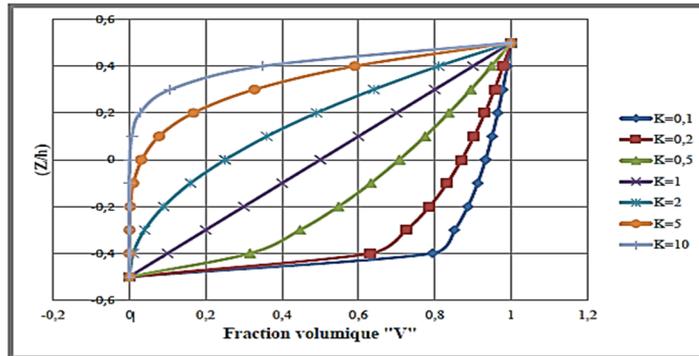


Figure . IV.10 : Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM.[43]

IV.8.2. Lois de mélangé en sigmoïdes de la plaque S-FGM :

En défini la fraction de volume de la plaque FGM en utilisant deux fonctions de loi de puissance pour assurer une bonne distribution des contraintes parmi toutes les interfaces. Les deux fonctions de loi de puissance sont définis par :

$$V_1(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{h}{2} + z}{\frac{h}{2}} \right)^k \quad \text{pour} \quad -h/2 \leq z \leq 0 \tag{IV.7}$$

$$V_2(z) = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{h}{2} + z}{\frac{h}{2}} \right)^k \quad \text{pour} \quad 0 \leq z \leq h/2 \tag{IV.8}$$

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

$$E(z) = V_1(z) E_1 + [1 - V_1(z)] E_2 \quad \text{pour} \quad -h/2 < z < 0 \tag{IV.9}$$

$$E(z) = V_2(z) E_1 + [1 - V_2(z)] E_2 \quad \text{pour} \quad 0 < z < h/2 \tag{IV.10}$$

La (Figure IV.3) montre que la variation de la fraction volumique définie par les équations (IV.7) et (IV.8) représente les distributions sigmoïdes, et cette plaque FGM est appelée (Plaque SFGM).

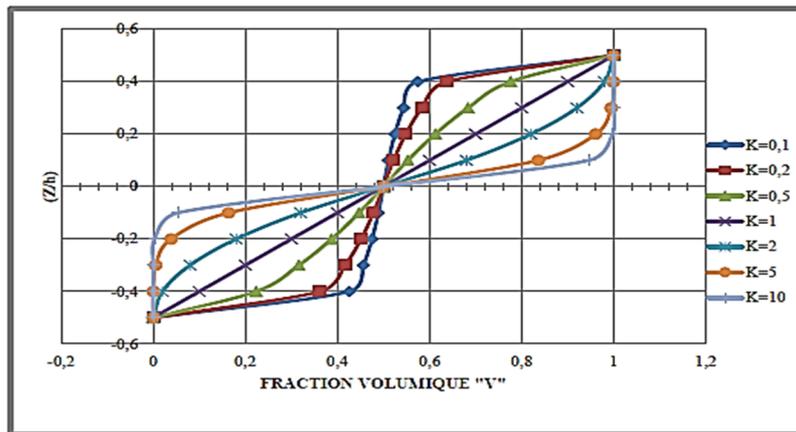


Figure. IV.11 : Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM[43]

IV.8. 3. Lois de mélangé en exponentielle de la plaque E-FGM :

Pour décrire les propriétés matérielles des matériaux FGM, les chercheurs utilisent la fonction exponentielle qui s’écrit sous la forme [43].

$$E(z) = E_2 e^{B(z + \frac{h}{2})} \tag{IV.11}$$

Avec

$$B = \frac{1}{h} \ln \left(\frac{E_1}{E_2} \right) \tag{IV.12}$$

La variation du module de Young à travers l’épaisseur de la plaqué E-FGM est représentée sur la (Figure IV.4).

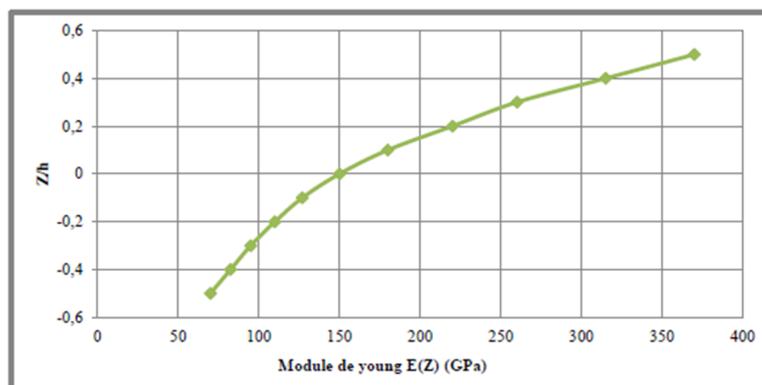


Figure. IV.12 :Variation du module de Young dans une plaque E-FGM[43]

IV.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les matériaux composites et a gradient de propriétés « FGM », les notions fondamentale et puis on est passé à décrire les différentes méthodes modernes d’usinage des FGM, leurs propriétés, les avantages et leurs inconvénients ainsi leurs domaines d’application.

Chapitre –V–

Dimensionnement des poutres en T \acute{e} renforc \acute{e} es en flexion par des plaques FGM

V. 1 . Introduction

Devenus plus accessibles sur le plan de résistance, les matériaux composites FGM sont une solution très attractive pour répondre au besoin de renforcement des bâtiments. Le travail actuel présente une méthode analytique basée sur l'équilibre des forces afin d'estimer la section du renfort nécessaire d'une poutre T^e en béton armé renforcée avec liaison externe des plaques FGM en utilisant des nouvelles lois de mélanges. La méthode est basée sur les mêmes principes que ceux adoptés dans les dispositions du BAEL concernant la résistance à la flexion des poutres en T^e conventionnel mais étendu ici pour tenir compte de la plaque de renforcement en FGM.

L'effet de porosité qui peut se produire à l'intérieur des matériaux FGM lors de leurs fabrication est également pris en considération dans ce travail.

V.2. Analyse théorique:

V.2.1. Conditions de compatibilités:

Soit une poutre en béton armé de section en T^e de largeur b et de hauteur h . cette section est renforcée par une plaque FGM :

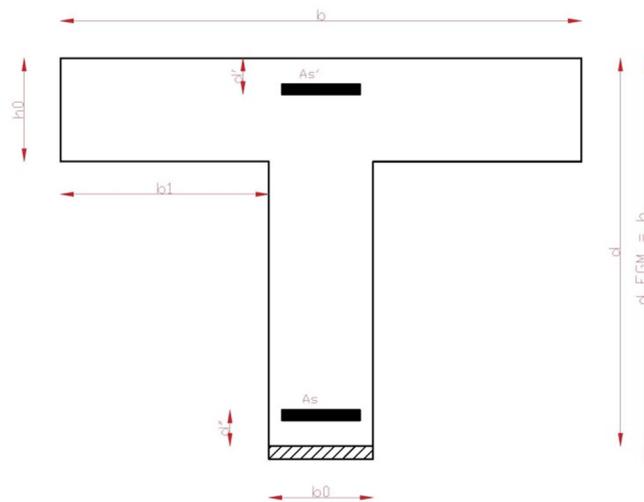


Figure V.1 : Géométrie d'une section en T^e d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par composites FGM.

1^{er} cas : Si $M_u \leq M_t$: la table n'est pas entièrement comprimé .Le dimensionnement composite FGM sera identique a une section rectangulaire ($b \times h$) :

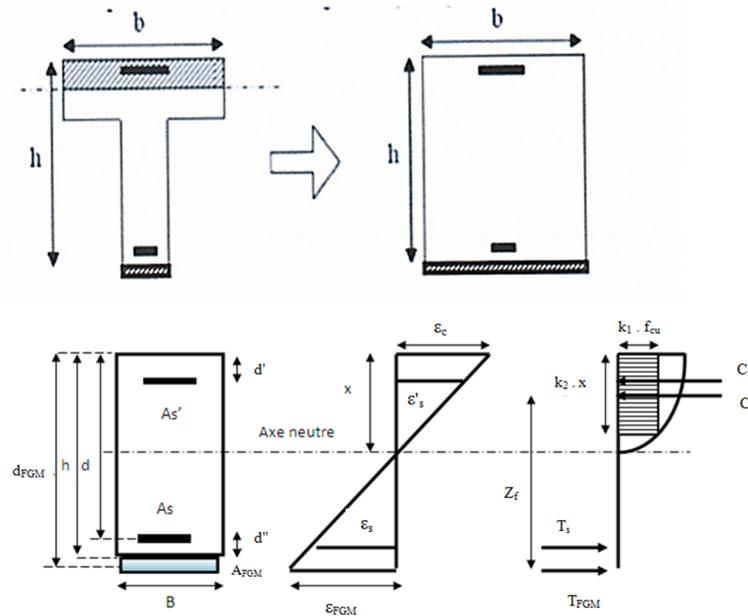


Figure V.2.:Diagramme de distribution des contraintes, déformations et des forces d'une poutre rectangulaire en béton armé.

Selon l'hypothèse de Bernoulli: au cours de la déformation, les sections droites restent perpendiculaire à la courbe moyenne; les sections droites restent planes après déformation, de laquelle il résulte que le diagramme des déformations est représenté par une droite. Considérons les triangles semblables du diagramme des déformations: figure (V.6)

$$\varepsilon_s = \frac{d-x}{x} \varepsilon_c \quad \varepsilon_s' = \frac{x-d'}{x} \varepsilon_c \quad \varepsilon_{FGM} = \frac{d_{FGM} - x}{x} \varepsilon_c \quad \text{V.13}$$

- ε_s : déformation de l'acier tendu
- ε_c : déformation du béton
- ε_s' : déformation de l'acier comprimé
- ε_{FGM} : déformation des plaques FGM

Soit un paramètre caractéristique α de l'état de déformation de la section défini par:

$$\alpha = \frac{x}{d_{FGM}}$$

V.2.2. Conditions d'équilibres:

La distribution parabolique des contraintes dans le béton (figure V.6), est remplacée par équivalence à une distribution rectangulaire, définie par les paramètres k_1 et k_2 :

– Force de compression du béton : $c = k_1 \cdot k_2 \cdot f_{CU} \cdot b \cdot x$ (V.14)

– Force de compression de l'acier : $c_s = A_s \cdot \sigma_s$ (V.15)

– Force de traction de l'acier : $T_s = A_s \cdot \sigma_s$ (V.16)

– Force de traction des plaques FGM : $T_{FGM} = A_{FGM} \cdot \sigma_{FGM}$ (V.17)

–

Avec:

$$\sigma_{FGM} = E_{FGM} \cdot \varepsilon_{FGM}$$

L'équilibre des forces :

Dans toute section d'une poutre en équilibre soumise à la flexion, la somme des forces normales internes est égale à la somme des forces agissant sur la section.

$$c + c_s = T_s + T_{FGM} \Rightarrow k_1 \cdot k_2 \cdot f_{CU} \cdot b \cdot x + A_s \cdot \sigma_s = A_s \cdot \sigma_s + A_{FGM} \cdot \sigma_{FGM} \quad (V.18)$$

L'équilibre des moments:

De plus la somme des moments des forces internes par rapport au centre de gravité de la section est égale au moment de flexion agissant sur la section. On prend $d_{FGM} \approx h$ et Soit M_u le moment de flexion;

$$M_u = k_1 \cdot k_2 \cdot f_{CU} \cdot b \cdot x \cdot z_{FGM} + A_s \cdot \sigma_s \cdot (d_{FGM} - d') - A_s \cdot \sigma_s \cdot (d_{FGM} - d) \quad (V.19)$$

$$M_u = A_{FGM} \cdot \sigma_{FGM} \cdot z_{FGM} + A_s \cdot \sigma_s \cdot (0.5 \cdot k_2 \cdot x - d') + A_s \cdot \sigma_s \cdot (z_{FGM} - d'') \quad (V.20)$$

Le bras de levier z_{FGM} est égal à :

$$z_{FGM} = d_{FGM} - 0.5 k_2 \cdot x = d_{FGM} (1 - 0.5 \cdot k_2 \cdot \alpha) \quad (V.21)$$

Avec:

$$x = \alpha \cdot d_{FGM} \quad (V.22)$$

Dans les équations précédentes, les contraintes de tractions sont positives et les contraintes de compressions sont négatives .la forces axiale est positive si elle est une traction et négative si elle est une compression. le moment M est positif s'il cause une traction à la fibre inférieure.

Calcul du moment réduit:

Si nous reprenons l'expression précédente:

$$M_U = k_1 \cdot k_2 \cdot f_{CU} \cdot b \cdot x \cdot z_F + A_S \cdot \sigma_S \cdot (d_F - d') - A_S \cdot \sigma_S \cdot (d_F - d) \quad (V.23)$$

Ou encore:

$$\frac{M_U + A_S \sigma_S (d_{FGM} - d) - A_S \sigma_S (d_{FGM} - d')}{b \cdot d_{FGM}^2 \cdot k_1 \cdot f_{CU}} = k_2 \alpha (1 - 0.5 k_2 \alpha) \quad (V.24)$$

Ce moment réduit augmente avec les sollicitations et lorsque les dimensions de la section diminuent. μ : s'exprime également par une équation du second degré en α qui une fois résolu nous donne :

$$\mu = k_2 \alpha - 0.5 k_2^2 \alpha^2 \Rightarrow 0.5 \alpha k_2^2 - k_2 \alpha + \mu = 0 \quad (V.25)$$

On pose :

$$\alpha = \frac{k_2 - \sqrt{k_2^2 - 2 k_2^2 \mu}}{k_2^2} \quad V.26$$

$$\beta = 1 - 0.5 k_2 \alpha \quad V.26$$

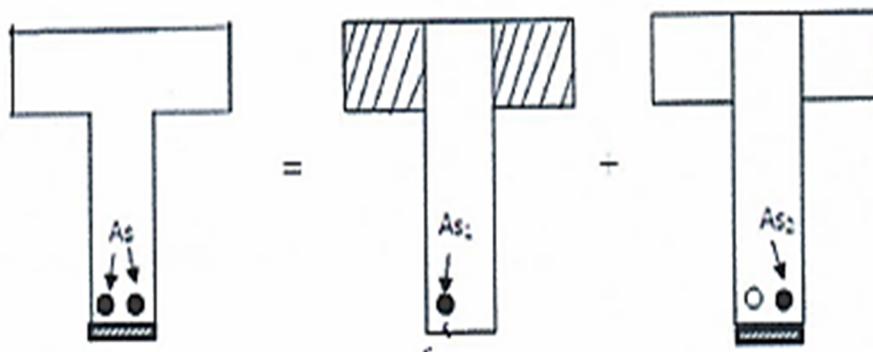
De l'équilibre du moment (V.20), on peut déduire la section du renfort A_{FGM} :

$$A_{FGM} = \frac{M_U - A_S \sigma_S (z_{FGM} - d'') - A_S \sigma_S (0.5 k_2 x - d')}{\sigma_{FGM} \cdot z_{FGM}} \quad (V.27)$$

Avec:

$$\sigma_{FGM} = E_{FGM} \cdot \varepsilon_{FGM} \quad (V.28)$$

2^{or} cas $M_u \geq M_t$: la table est entièrement comprimée .le dimensionnement du FGM sera en décomposant la section en T é de la manière suivante :



Le moment équilibre par les débords :

$$M_d = 2 \left[\frac{b-b_0}{2} \right] h_0 k_1 f_{bc} \left(d - \frac{h_0}{2} \right) \quad (V.28)$$

$$M_d = (b - b_0) h_0 k_1 f_{bc} \left(d - \frac{h_0}{2} \right) \quad (V.29)$$

$$A_{S1} = \frac{M_d}{\sigma_s \left(d - \frac{h_0}{2} \right)} \quad (V.30)$$

a) Le moment réduit sera :

$$\mu = \frac{M_R - A_{S1} \sigma_s (h-d) + A_{S2} \sigma_s (h-d)}{b_0 k_1 h^2 f_{bc}} \quad (V.31)$$

Avec :

$$A_{S2} = A_s - A_{S1} \quad (V.32)$$

Le moment résiduel sera : $M_R = M_u - M_d$ (V.33)

μ : s'exprime également par une équation du second degré en α qui une fois résolue nous donne :

$$\alpha = \frac{k_2 - \sqrt{k_2^2 - 2k_2^2 \mu}}{k_2^2} \quad (V.34)$$

On pose :

$$\beta = 1 - 0.5K_2 \alpha \quad (V.35)$$

Le bras de levier Z_{FGM} est égale à :

$$Z_{FGM} = h \cdot \beta \quad (V.36)$$

La position de l'axe neutre est définie par :

$$\gamma = \alpha \cdot h \quad (V.37)$$

Avec :

$$\sigma_{FGM} = E_{FGM} \cdot \varepsilon_{FGM} \quad (V.38)$$

$$E_{FGM} = (E_C - E_m) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^k + E_m \quad (V.39)$$

Avec :

E_C : module de Young de céramique .

E_m : module de Young de métal .

$$0 \leq k \leq \infty \quad (V.40)$$

$$Z = \frac{\int_{-0.5h}^{0.5h} E_n \cdot z \cdot dz}{\int_{-0.5h}^{0.5h} E_n \cdot dz} \quad (V.41)$$

$$E_n = (E_c - E_m) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^k + E_m \quad (V.42)$$

Enfin la section du renfort en composite FGM sera :

$$A_{FGM} = \frac{M_R - A_{s2} \sigma_s (z_{FGM} - d'') - A'_S \sigma'_s (0.5k_2 \cdot y - d')}{\sigma_{FGM} - z_{FGM}} \quad (V.43)$$

La plaque de renforcement est considérée en FGM constituée d'un mélange de métal et de céramique, dans lequel la composition varie depuis le sommet jusqu'à la surface inférieure

Le m tieriel en surface supérieure et surface inférieure est en céramique et en métal, respectivement.

La plaque FGM est considérée poreuse avec une fraction volumique de porosité, β ($\beta < 1$), répartie entre le métal et la céramique, les règles de mélanges utilisées est comme suit :

Type	Taux de distribution de porosité dans Céramique -Métal	Module de Young
Type-II	50%-50%	$E(z) = (E_c - E_m) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^k + E_m - (E_c + E_m) \frac{\beta}{2}$
Type-III	60%-40%	$E(z) = (E_c - E_m) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^k + E_m - (3E_c + 2E_m) \frac{\beta}{5}$
Type-IV	40%-60%	$E(z) = (E_c - E_m) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^k + E_m - (2E_c + 3E_m) \frac{\beta}{5}$
Type-V	75%-25%	$E(z) = (E_c - E_m) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^k + E_m - (3E_c + E_m) \frac{\beta}{4}$
Type-VI	25%-75%	$E(z) = (E_c - E_m) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^k + E_m - (E_c + 3E_m) \frac{\beta}{4}$

Il est à noter que k est l'indice de loi de puissance qui prend des valeurs supérieures ou égale à zéro. La plaque FGM est une plaque entièrement en céramique lorsque k est mis à zéro et entièrement métallique pour une grande valeur de k .

V.3. Résultats et discussions:

Dans cette partie, des résultats numérique et graphiques sont présentés afin de prédire la section du renfort nécessaire d'une poutre T en béton armé renforcées en flexion par collage externe des plaques FGM.

Les propriétés des matériaux pris en charge dans la présente analyse sont les suivantes:

Tableau V.1 : Propriété mécanique des matériaux utilisés.

Matériaux	E (MPa)
Al_2O_3	380000
ZrO_2	151000
Ti-6Al-4V	105700
Al	70000

Le coefficient de Poisson est pris égal à 0,3 à la fois de l'alumine et de l'aluminium. Les propriétés mécaniques de plaque FGM changent à travers l'épaisseur de la plaque selon la loi de puissance.

Les caractéristiques géométriques d'une section T de la poutre étudiée sont représentées dans la figure suivante:

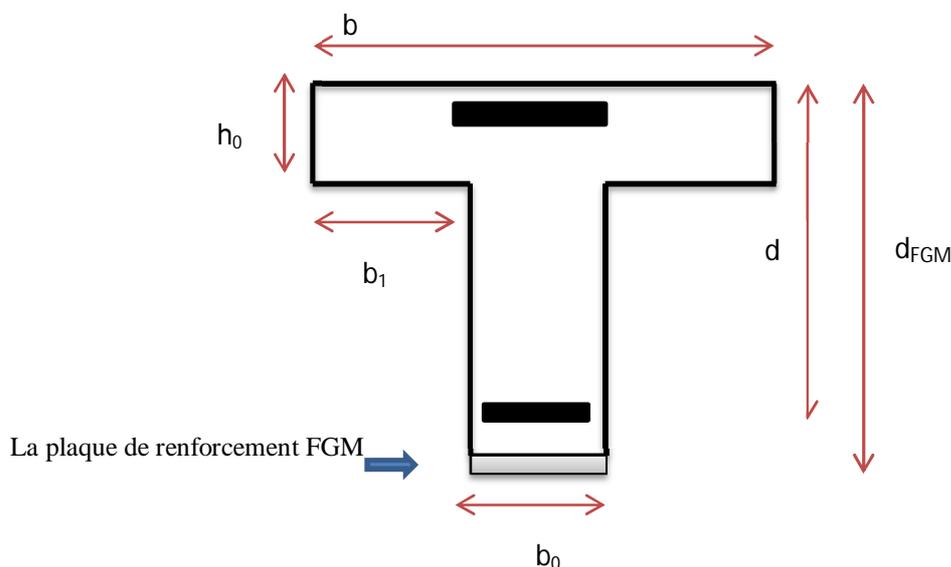


Figure V.3: Géométrie d'une section en T d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par une plaque FGM.

Tableau V.2: Propriétés mécanique et géométrique des matériaux utilisées

Section en béton	Armatures	Matériaux composite
$f_{cu}=30\text{MPa}$	$E_s=20.10^4\text{MPa}$	$E_{FRP}=20.10^3\text{MPa}$
$\varepsilon_{bc}=0.003$	$\sigma_e=400\text{MPa}$	$\sigma_{FRP}=250\text{MPa}$
$b=3500\text{mm}$	$A_s=44800\text{mm}^2$	$\varepsilon_{FRP}=0.0125$
$b_0=1200\text{mm}$	$A_{s'}=4800\text{mm}^2$	$M_u=21117\text{KN.m}$
$h=1200\text{mm}$	$d=1100\text{mm}$	
$k_1=0.85$	$d'=d''=100\text{mm}$	
$k_2=0.85$		

Les tableaux (V.3) et (V.4) présentent une comparaison des résultats de la section du renfort (A_{FGM}) d'une poutre en T \acute{e} renforcée par collage externe des plaques en FRP avec une autre renforcée en FGM. La poutre de forme T \acute{e} est renforcée sur sa partie inférieure. Le moment ultime appliqué sur la poutre renforcée varie de 22000 KN.m à 28000KN.m L'indice de puissance de la plaque de renforcement en FGM est pris égal à ($k=5$ et 10 et ∞).

Tableau V.3: Comparaison de la section du renfort d'une poutre en T \acute{e} en béton armé renforcée

Modèle de calcul		La section du composite A_{FRP} mm^2
Picard et al 1995		15750
HayderA. Rasheed 2003		15932
Présente	Céramique $k=0$	812
	FGM $k=5$	2900
	FGM $k=10$	4252
	Métal $k=\infty$	4409

Tableau V.4: Comparaison de la section du renfort d'une poutre en T \acute{e} en béton armé renforcée par collage externe des plaques FRP et FGM

Plaque de renforcement	Mu (KN.m)			
	22000	24000	26000	28000
CFRP	15873	24820	34603	45514.20
Céramique k=0	1248	2749	5360	10036
FGM k=5	4457	9816	19138	35831
FGM k=10	6535	14393	28062	52540
Métal k=∞	6776	14925	29099	54479

A partir des résultats, on peut constater que la section du renfort devient plus faible quand la plaque de renforcement est en FGM. Cette section devient plus importante avec l'augmentation du l'indice de puissance le moment ultime.

Tableau V.5: Effet de porosité sur le dimensionnement d'une poutre en T \acute{e} en béton armé renforcée par collage externe d'une plaque FGM poreuse .

Plaque de renforcement en FGM	Porosité	k=2		k=5		k=10		k=20	
		σ_{FGM}	A_{FGM}	σ_{FGM}	A_{FGM}	σ_{FGM}	A_{FGM}	σ_{FGM}	A_{FGM}
Al/Al ₂ O ₃	a =0	1969.40	1538.61	1044.96	2899.76	712.93	4251.93	687.32	4408.60
	a=0.1	1837.83	1648.75	929	3261.70	510.70	5933.24	466.5	6495.39
	a=0.2	1742.37	1739.06	923.96	3279.5	360.67	8401.35	246.42	12296.25
Al/ZrO ₂	a =0	1140.02	2657.95	774.28	3913.40	691.15	4384.17	687.27	4408.91
	a=0.1	1027.35	2949.48	653.14	4939.29	559.51	5415.63	554.73	5462.35
	a=0.2	921.53	3288.16	538.79	5623.94	428.68	7068.45	422.19	7177.18
Ti-6Al-4V/Al ₂ O ₃	a =0	1318.09	2298.88	798.29	3795.78	675.74	4606.90	649.97	4661.94
	a=0.1	1202.20	2520.48	673.70	4497.75	508.27	5961.60	497.56	6089.89
	a=0.2	1099.82	2755.11	569.93	5316.61	362.73	8353.54	345.18	8778.42

Le tableau (V.5) présente l'effet de porosité sur la limite élastique de la plaque FGM et sur la section du renfort d'une poutre en T \acute{e} renforcée en flexion par collage externe des plaques FGM poreuses. La fraction volumique de porosité est considérée égale 0%, 10% et

20%. L'indice de puissance est pris égale ($k=2, 5, 10$ et 20). Différentes combinaison de la plaque de renforcement en FGM sont considérées à savoir Al/Al_2O_3 , Al/ZrO_2 et $Ti-6Al-4V/Al_2O_3$. A partir de ce tableau, on peut conclure que la section du renfort doit être plus importante quand la plaque FGM est poreuse. On peut également noter que la limite élastique devient plus faible avec l'existence des pores dans la plaque de renforcement.

Le tableau (V.6) présente l'effet de la résistance caractéristique du béton f_{cu} sur la section du renfort d'une poutre en Té renforcée en flexion par collage externe des plaques FGM poreuses avec la différentes valeurs de la résistance caractéristique du béton sont pris en considération à savoir ($f_{cu}=35, 40$ et $45Mpa$). A partir des résultats, il est clair que la section du renfort devient plus faible quand la résistance caractéristique du béton augmente.

Tableau V.6:Effet de la résistance caractéristique du béton f_{cu} sur le dimensionnement d'une poutre en Té en béton armé renforcée par collage externe d'une plaque FGM poreuse, $k=5$

Plaque de renforcement en FGM	Porosité	$f_{cu}=35Mpa$		$f_{cu}=40Mpa$		$f_{cu}=45Mpa$	
		σ_{FGM}	A_{FGM}	σ_{FGM}	A_{FGM}	σ_{FGM}	A_{FGM}
Al/Al_2O_3	$a=0$	1965.64	1410.95	3978.46	686.64	6914.30	406.47
	$a=0.1$	1747.52	1587.07	3536.99	722.34	10649.91	263.89
	$a=0.2$	1738.3	1595.73	3517.78	776.56	10592.05	265.33
Al/ZrO_2	$a=0$	1904.21	1456.48	2947.91	926.68	8876.19	316.63
	$a=0.1$	1228.61	2257.37	2486.71	1098.55	7487.51	375.35
	$a=0.2$	1013.50	2736.48	2051.33	1331.71	6176.59	455.02
$Ti-6Al-4V/Al_2O_3$	$a=0$	1501.64	1846.94	3039.32	898.81	9151.42	307.11
	$a=0.1$	1267.28	2188.50	2564.97	1065.03	7771.37	361.64
	$a=0.2$	1072.09	2586.94	2169.92	1258.93	6533.64	430.15

Le tableau (V.7) présente l'effet de la limite élastique de l'acier σ_e sur la section du renfort d'une poutre en Té renforcée en flexion par collage externe des plaques FGM poreuses. La limite élastique de l'acier est considérée égale ($\sigma_e= 300, 456Mpa$). Il est à noter que la limite élastique de l'acier à un effet considérable sur la section de la plaque de renforcement.

Tableau V.7: Effet de limite d'élasticité de l'acier σ_e sur le dimensionnement d'une poutre en T_e en béton armé renforcée par collage externe d'une plaque FGM poreuse, $k=5$.

Plaque de renforcement en FGM	Porosité	$\sigma_e=300Mpa$		$\sigma_e =456Mpa$	
		σ_{FGM}	A_{FGM}	σ_{FGM}	A_{FGM}
Al/Al ₂ O ₃	$a =0$	1932.13	3544.86	1984.81	247.43
	$a=0.1$	1717.73	3987.32	1764.57	278.31
	$a=0.2$	1708.40	4009.10	1754.98	279.83
Al/ZrO ₂	$a =0$	1431.65	4784.10	1470.68	333.92
	$a=0.1$	1207.67	5671.39	1240.59	395.86
	$a=0.2$	996.23	6875.09	1023.39	479.88
Ti-6Al-4V/Al ₂ O ₃	$a =0$	1476.04	4640.22	1516.28	323.88
	$a=0.1$	1245.67	5498.35	1279.64	383.78
	$a=0.2$	1053.81	6499.38	1082.55	453.65

Le tableau (V.8) présente l'effet de la limite d'élasticité de l'acier sur le dimensionnement d'une poutre en T_e en béton armé renforcée par collage externe d'une plaque FGM poreuse, L'indice de puissance est pris égale ($k=5$ et 10),. La fraction volumique de porosité est considérée égale 0%, 10% et 20% et les types de distribution de porosité. On peut remarquer l'augmentation de la section de la plaque de renforcement à mesure que la fraction volumique de porosité augmente. Contrairement à la section du renfort la limite élastique de la plaque FGM devient plus faible quand cette dernière contient des pores.

L'Effet de la variation de la hauteur du tablier sur le dimensionnement d'une poutre en T_e renforcée par collage externe d'une plaque FGM poreuse est présenté dans le tableau (V.9). La section des armature de traction est pris égale $A_s'=44800mm^2$. L'indice de puissance est pris égale ($k=5$ et 10). La fraction volumique de porosité est fixée à 20%. On peut conclure que la poutres en T_e avec un tablier plus épais a besoin des sections plus faibles de renfort.

Tableau V.8: Effet de la fraction volumique de porosité sur le dimensionnement d'une poutre en Té renforcée par collage externe d'une plaque FGM poreuse, $k=5, k=10$.

Indice de puissance k	Type de distribution de porosité	$a=0.1$		$a=0.15$		$a=0.20$	
		σ_{FGM}	A_{FGM}	σ_{FGM}	A_{FGM}	σ_{FGM}	A_{FGM}
k=5	Type II	1717.73	3987.32	1672.61	4049.88	1708.40	4009.10
	Type III	1699.55	4029.97	1674.76	4089.62	1595.85	4291.85
	Type IV	1739.42	3937.61	1683.89	4067.46	1675.69	4087.37
	Type V	1680.01	4076.84	1711.65	4001.50	2035.91	3364.18
	Type VI	1605.12	4267.06	1461.49	4686.42	1337.54	5120.69
k=10	Type II	867.52	7895.05	8769.43	10258.77	666.88	10270.37
	Type III	812.08	8434.09	724.68	9451.23	657.93	10410.13
	Type IV	923.14	7419.42	845.04	8105.13	720.31	9902.62
	Type V	729.36	9390.59	664.75	10303.25	870.46	8194.49
	Type VI	834.32	8209.22	691.46	9905.36	497.38	14428.16

Le tableau(V.10) présente l'effet de la variation de la largeur du tablier sur le dimensionnement d'une poutre en Té renforcée par collage externe d'une plaque FGM poreuse. L'indice de puissance est pris égal(e) ($k=5$ et 10). L'effet de la variation du taux de distribution de porosité est montré dans ce tableau. Il est clair que la poutres en Té avec un tablier plus large a besoin des sections plus faibles de renfort.

Les figures (V.4 et V.5) présentent l'effet de porosité sur la section du renfort nécessaire d'une poutre en Té renforcée en flexion par collage externe des plaques FGM poreuse en en_{Al/ZrO_2} et en Al/Al_2O_3 en fonction de l'indice de puissance, respectivement. La fraction volumique de porosité est pris égal(e) ($\alpha=0, 0.1$ et 0.2). A partir de ces figures, on peut remarquer que la section du renfort devient plus importante avec l'augmentation de la fraction volumique de porosité et l'indice de puissance.

Tableau V.9: Effet de la variation de la hauteur du tablier sur le dimensionnement d'une poutre en T \acute{e} en béton armé renforcée par collage externe d'une plaque FGM poreuse, $a=0.2$, $A_{s'}=44800\text{mm}^2$

Indice de puissance k	Type de distribution de porosité	b=3300mm		b=3500mm		b=3800mm	
		σ_{FGM}	A_{FGM}	σ_{FGM}	A_{FGM}	σ_{FGM}	A_{FGM}
k=5	Type II	1348.59	591.86	1083.68	2856.56	2895.77	2895.77
	Type III	1409.64	566.23	2985.88	1036.75	287.82	287.82
	Type IV	1322.76	603.42	2801.86	1104.84	3026.86	3026.86
	Type V	1607.12	496.65	3404.17	909.36	275.35	275.35
	Type VI	1055.84	755.97	1010.18	3022.13	2840.31	2840.31
k=10	Type II	484.23	1235.65	1115.07	2776.15	293.44	293.44
	Type III	519.36	1536.85	1100.10	2813.29	3450.89	3450.89
	Type IV	568.60	1403.75	120.41	2570.22	241.52	241.52
	Type V	687.13	1161.61	1455.47	2126.87	2267.16	2267.16
	Type VI	390.25	2045.27	826.63	3744.01	367.62	367.62

Les figures (V.6 et V.7) présentent l'effet du taux de distribution de porosité entre les particules de la plaque FGM sur la section du renfort nécessaire d'une poutre en T \acute{e} renforcée en flexion par collage externe des plaques FGM en Al/Al $_2$ O $_3$ et Al/ZrO $_2$ en fonction de l'indice de puissance, respectivement. Le taux de porosité dans la plaque FGM est considéré égal à 20%. Il est à noter que la section du renfort devient plus faible quand la distribution des pores dans la plaque de renforcement est de type IV.

L'effet de la limite élastique de l'acier sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe des plaques FGM en Al/Al $_2$ O $_3$ et Al/ZrO $_2$ en fonction de l'indice de puissance est présenté dans les figures (V.8 et V.9). La plaque FGM de renforcement est considérée parfaite ($\alpha=0$). Le moment ultime appliqué sur la poutre est pris égal à $M_u=19650\text{kn.m}$. A partir de ces graphes, on peut constater que la section du renfort devient plus importante pour une limite élastique de l'acier plus faible.

Tableau V.10: Effet de la variation de la largeur du tablier sur le dimensionnement d'une poutre en Té en béton armé renforcée par collage externe d'une plaque FGM poreuse, $a=0.2$,

Indice de puissance k	Type de distribution de porosité	$h_0=200\text{mm}$		$h_0=225\text{mm}$		$h_0=250\text{mm}$	
		σ_{FGM}	A_{FGM}	σ_{FGM}	A_{FGM}	σ_{FGM}	A_{FGM}
k=5	Type II	1754.98	463.33	4815.55	256.47	2669.47	376.74
	Type III	1834.43	443.26	5033.56	245.37	2790.32	360.43
	Type IV	1721.73	472.38	4723.34	261.48	2618.35	384.10
	Type V	2091.42	388.80	5738.71	215.22	3181.21	316.14
	Type VI	1374.01	591.80	3770.20	327.59	2089.98	481.20
k=10	Type II	685.06	1186.95	1879.78	657.03	866.17	1161.10
	Type III	675.87	1203.10	1854.54	665.97	1028.05	978.27
	Type IV	739.95	1098.90	2030.39	608.30	1125.53	893.54
	Type V	894.20	909.35	2453.6	503.37	1360.15	739
	Type VI	507	1601.11	1889.89	653.52	772.49	1301.95

L'effet de déformation unitaire du béton sur le dimensionnement de la section du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe des plaque FGM parfaite en $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ et Al/ZrO_2 en fonction de l'indice de puissance est présenté dans les figures V.10 et V.11, respectivement. La valeur de la déformation unitaire du béton est pris égale ($\epsilon_{bc}=3\text{‰}$, 3.5‰ et 4‰). L'augmentation de la déformation unitaire du béton réduit la section du renfort nécessaire.

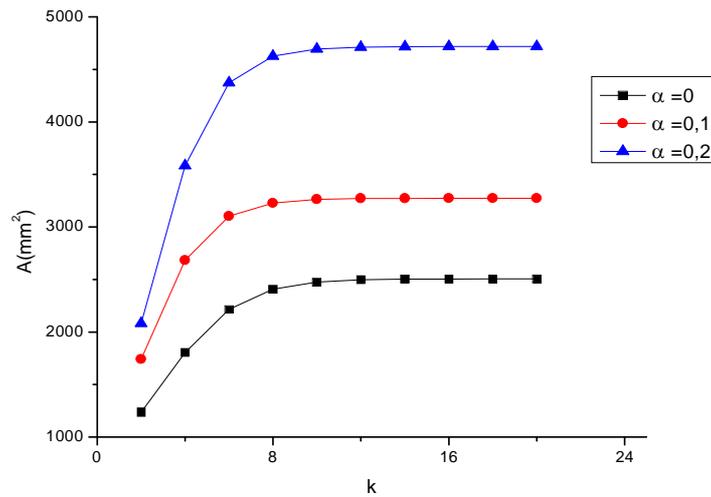


Figure. V.4 : Effet de porosité sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM poreuse en Al/ZrO₂ en fonction de l'indice de puissance.

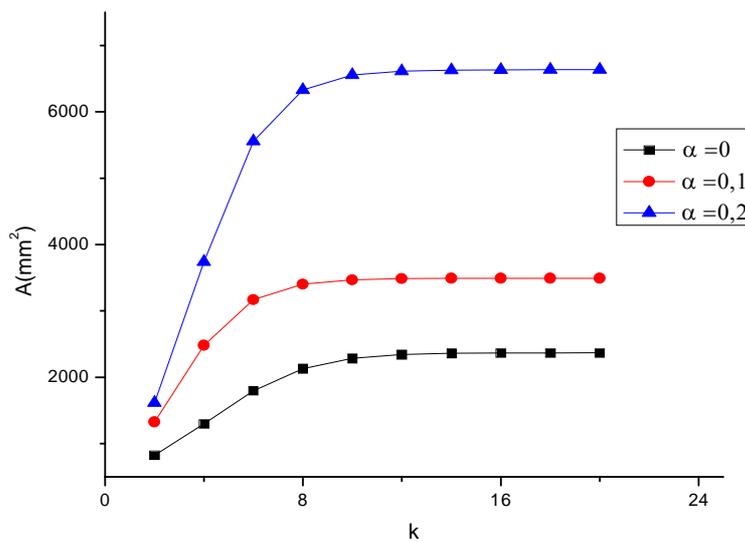


Figure. V.5 : Effet de porosité sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM poreuse en Al/Al₂O₃ en fonction de l'indice de puissance

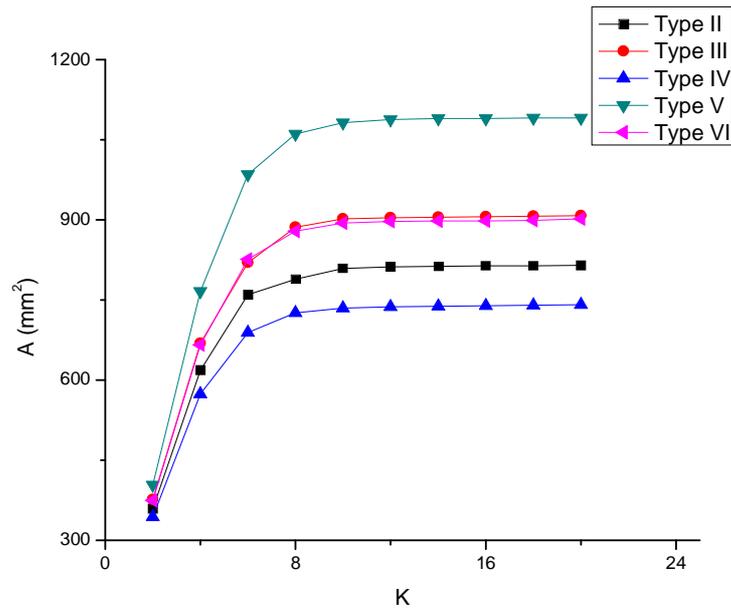


Figure .6 : Effet du taux de distribution porosité sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM poreuse en Al/ZrO_2 en fonction de l'indice de puissance.

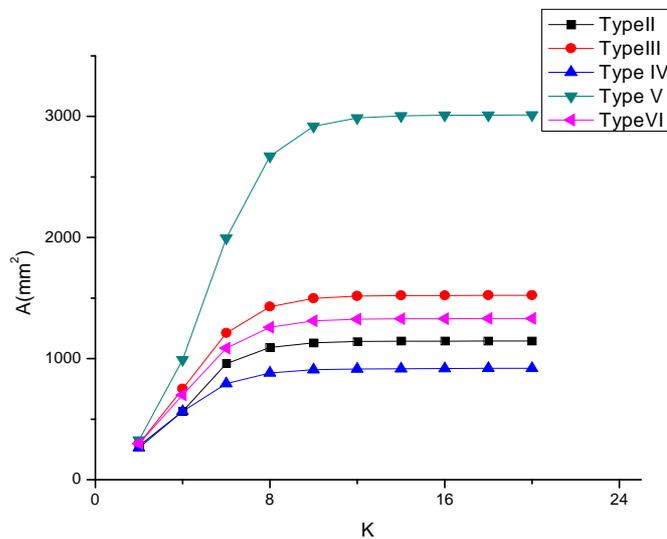


Figure. V.7 : Effet du taux de distribution porosité sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM poreuse en Al/Al_2O_3 en fonction de l'indice de puissance.

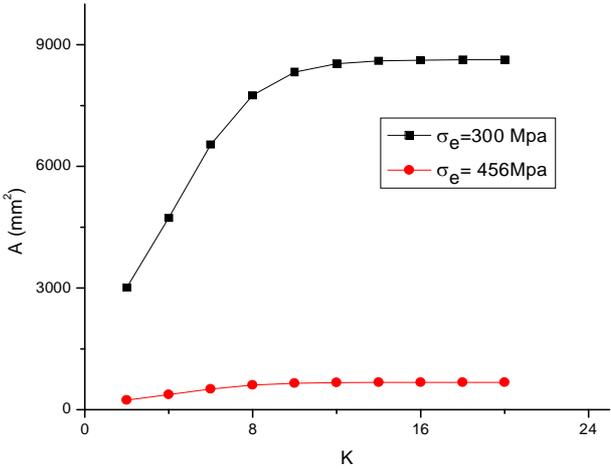


Figure. V.8 : Effet de la limite élastique de l'acier sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM parfaite en Al/ZrO₂ en fonction de l'indice de puissance.

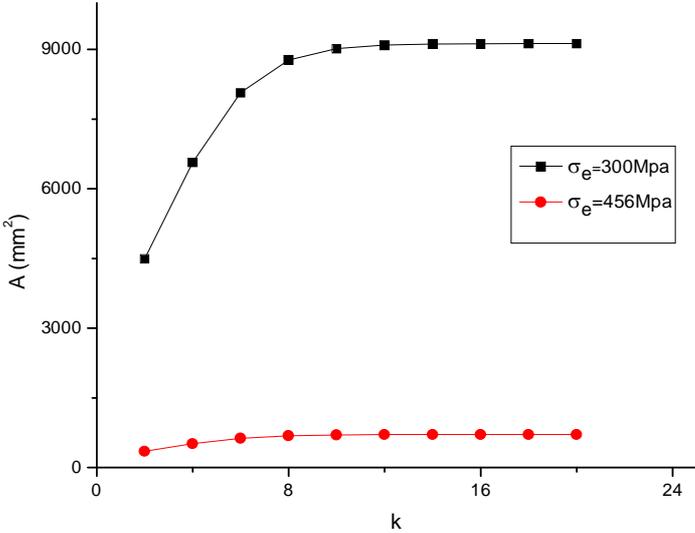


Figure .9 : Effet de la limite élastique de l'acier sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM parfaite en Al/Al₂O₃ en fonction de l'indice de puissance.

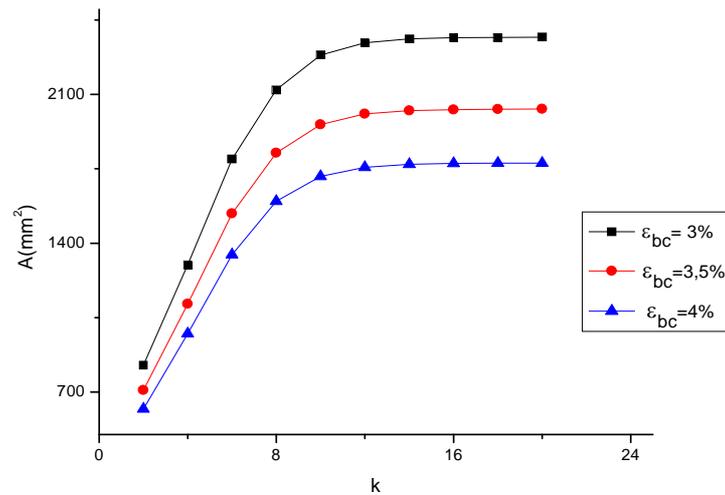


Figure. V10 : Effet de la déformation unitaire du béton sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM parfaite en Al_2O_3 en fonction de l'indice de puissance.

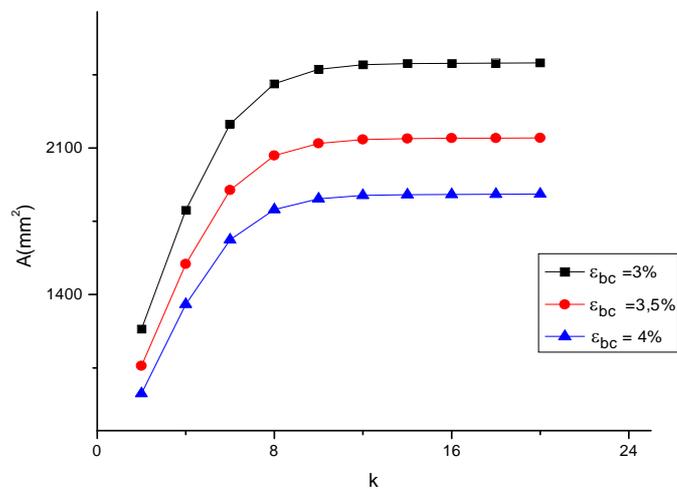


Figure .V.11 : Effet de la déformation unitaire du béton sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM parfaite en Al/ZrO_2 en fonction de l'indice de puissance.

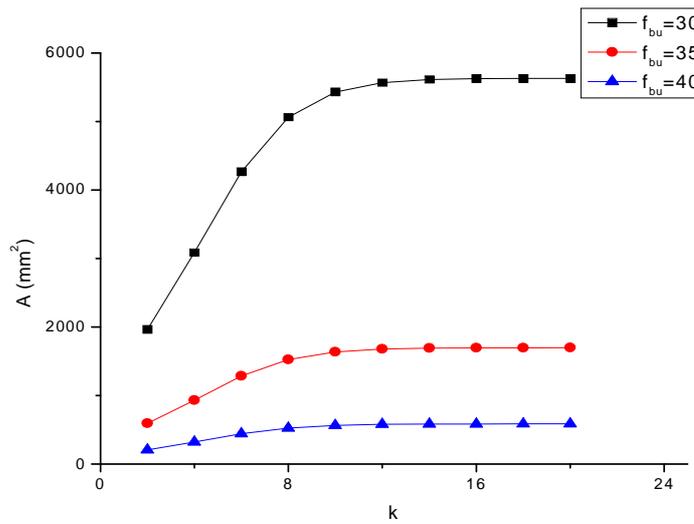


Figure V.12 : Effet de la résistance caractéristique du béton sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM parfaite en Al/ZrO₂ en fonction de l'indice de puissance.

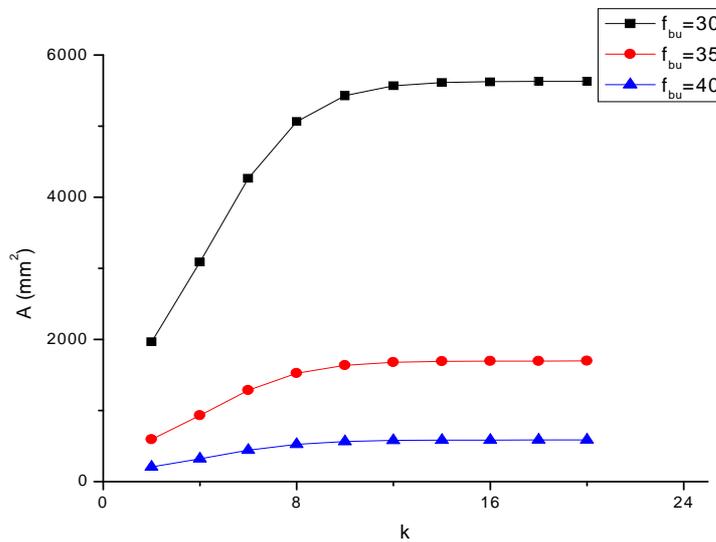


Figure V.13 : Effet de la résistance caractéristique du béton sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM parfaite en Al/Al₂O₃ en fonction de l'indice de puissance.

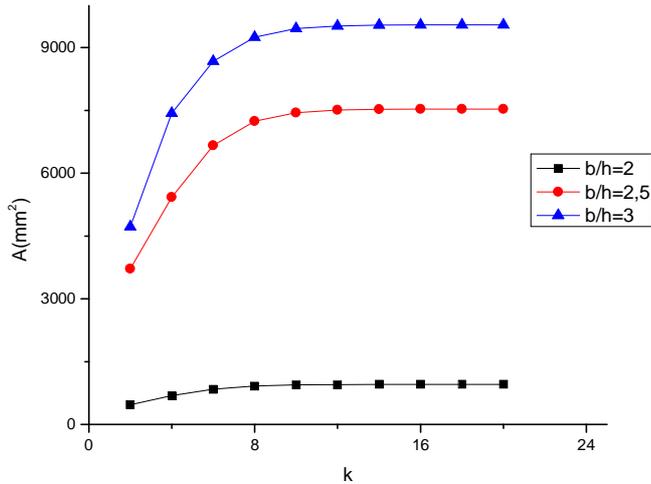


Figure V.14. Effet de la résistance caractéristique du béton sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM parfaite en Al/ZrO₂ en fonction de l'indice de puissance.

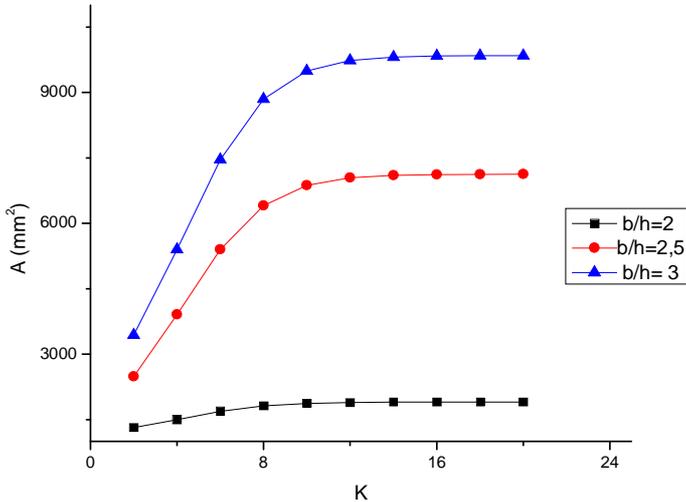


Figure V.15. Effet de la résistance caractéristique du béton sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe d'une plaque FGM parfaite en Al/Al₂O₃ en fonction de l'indice de puissance.

L'influence du rapport de géométrie de la poutre sur la section du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe des plaque FGM en Al/Al₂O₃ et Al/ZrO₂

en fonction de l'indice de puissance est montré dans les figures V.14 et V.15, respectivement. Ces figures montrent que la section du renfort nécessaire devient plus importante lorsque le rapport b/h augmente.

Les figures (V.12 et V.13) montrent l'influence de la résistance caractéristique du béton sur le dimensionnement de la poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe des plaques FGM parfaite en Al/Al_2O_3 et Al/ZrO_2 , respectivement. La poutre en béton armé est de forme T_e. La résistance caractéristique du béton est prise égale ($f_{cu} = 30$ et 35 et 40 Mpa). A partir des graphes, on peut conclure que la section du renfort diminue avec l'augmentation de la résistance caractéristique du béton.

V.4. Conclusions:

Dans ce travail nous avons présenté une méthode analytique basée sur le règlement BAEL pour le dimensionnement d'une poutre en T_e renforcée en flexion par une plaque composite de type FGM. L'effet de porosité qui peut se produire au cours de fabrication des matériaux FGM est montré dans cette étude en utilisant des nouvelles lois de mélanges. Les résultats trouvés montrent l'effet important des pores dans le dimensionnement des poutres en T_e renforcée en flexion par des plaques FGM.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les structures en béton armé demeurent en excellent état après plus de 100ans d'exploitation, leur durée de vie diminue suite a une pathologie structurelles issue des erreurs de conception, des défauts de résistance dus a un changement excessif ou dégradations des matériaux.

On a fait la connaissance aux différents types de pathologies du béton qui est, dans la majorité des cas, la cause essentielle dans l'effondrement des structures. Comme on a vu les causes et les types de ces pathologies (chimiques physiques mécaniques) .

Dans le domaine du génie civil, les matériaux composites sont utilisés pour le renforcement et la réhabilitation d'éléments structuraux en béton armé, tels que les poutres, les colonnes, et les dalles.

Les plaques en matériaux fonctionnellement gradué (FGM) sont largement utilisées dans des divers domaines d'ingénierie comme la mécanique, la génie civile , aérospatial, chimique, électrique, etc..

Nous avons présenté dans ce travail une étude analytique sur le dimensionnement d'une poutre en Té renforcée en flexion par collage externe des plaques en matériaux à gradient de propriétés (FGM). L'effet de porosité est montré dans cette analyse en utilisant des nouvelles lois de mélanges qui prennent en considération diverses taux de distribution des pores entre les particules de la plaque de renforcement FGM. L'influence de plusieurs paramètres tels que: l'indice de puissance, la géométrie de la poutre, la résistance caractéristique du béton, sur la section du renfort est également étudié. Les résultats montrent que la section du renfort devient plus importante quand la plaque de renforcement est poreuse.

Le taux de distribution de porosité à un effet considérable et ne doit pas négliger dans l'étude des comportement des structures FGM.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme de master « Analyse des calculs aux états limites :cas des éléments des structures en armé renforcé par collage des composites . RABAHI Abderezek .
- [2] Thèse de Doctorats MOHCENE Boukhezar « Réhabilitation des structures en béton armé» .
- [3]. Perfectionnement sur les techniques de réhabilitation de renforcement des structure , rencontres scientifique ,SOCOTEC-CTC année 2002.
- [4]. Document technique SIKA El-Djazair année2002.
- [5] Bricard, C. (2012). Pathologies du béton armé. Journée Technique OA mode doux.
- [6] Courard, L., & Bissonnette, B. (2016). Réparation des ouvrages en béton armé-Partie 1: Pathologies et diagnostic. Techniques de l'Ingénieur. Analyse Chimique et Caractérisation.
- [7] «Les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton», Année 2011.
- [8] Polycopie Réhabilitation des structures élaborées par Dr. OUZAA Kheira .
- [9]. SIDNEY M.JOHNSON, " Dégradation, entretien et réparation des ouvrages du génie civil", Editions Eyrolles, 1969..
- [10]. MARC MAMILLAN, « Restauration des bâtiments en béton armé, Techniques » de l'ingénieur, Tome 4, Editions Eyrolles, 1996, (2350-1,2350-14).
- [11]. BERNARD BLACHE, JEAN-DANIEL MERLET, «Comment réparer le béton armé», Cahiers techniques du bâtiment, Editions du Moniteur, Avril 1993,(25-32).
- [12]Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique
- [13].Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, «Recommandations techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages», premier semestre 1992.
- [14].Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, «Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages, »Deuxième semestre 1992.
- [15] Fukuyama, H., & Sugano, S. (2000). Japanese seismic rehabilitation of concrete buildings after the Hyogoken-Nanbu Earthquake. Cement and Concrete Composites,22(1),59-79.
- [16] Monti, G. (2003, July). Seismic upgrade of reinforced concrete columns with FRP. In Seminar on: Seismic Retrofitting of the South Tower, Tehran, Iran.
- [17] Lorry-Alan Moalic, « Réhabilitation d'ouvrages en béton armé Du diagnostic au confortement », Projet de Fin d'Études élève ingénieur de 5ème année.

Références bibliographiques

- [18] Theillout, J-N. (1997) « Renforcement des structures à l'aide de plats métalliques collés», In: Calgaro, J.A. et Lacroix, R. : Maintenance et Réparation des Ponts, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1997, 666 p.
- [19] Contribution a l'étude des matériaux composites dans le renforcement et réparations des éléments structuraux linéaires en béton.
- [20] Thèse de doctorat de FERRIER Emmanul « Renforcement au cisaillement des poutres en béton armé par matériaux composites naturels ». l'université de Lyon
- [21] Thèse de doctorat Bourada F « étude de la stabilité des plaques composites épaisses en utilisant des théories de déformation d'ordre élevé », centre universitaire belhadjbouchaibdeaintémouchent,
- [22] Thèse de doctorat Merazi. M (2015) « Analyse mécanique des structures composites: Etude comparative entre les différentes théories des plaques», université Djilali liabes de SIDI BEL ABBES.
- [23] Ait Atman, H., Tounsi, A., Bernard, F. and Mahmoud, S.R. (2015), « A computational shear displacement model for vibrational analysis of functionally graded beams with porosities, » Steel Compos. Struct.,19(2), 369-384.
- [24] Thèse de doctorat Mme ELMOSSOUESS Bouchra « étude de la stabilité des plaques en matériaux fonctionnellement gradués en utilisant des théories de déformation de cisaillement d'ordre. »
- [25] Matériaux composites 4^e édition Daniel Gay .
- [26] Thèse de doctorat MENAIL Younes «Analyse de l'effet du vieillissement a Lair ,dans Léau douce et Léau salée sur la tenue en fatigue de composites a matrice organique ».
- [27] Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme de Magister « Modélisation d'une plaque rectangulaire en composite en vibration sous effet thermique avec variation linéaire d'épaisseur. » Option dynamique des moteur et vibre acoustique .
- [28] Koizumi M.(1992), « Recent Progress of functionallygradedmaterials in Japan». Ceram. Eng. Sci. Proc; 13(7-8): 333-347.
- [29] Thèse Doctorat Abdi, 1997. Elaboration Et Caractérisation De Composites Duplex, « Composites Laminaires Tri- Couches A Base D'alumine », De Lyon Et L'université Claude Bernard Lyon I-France, 1997, 212p.
- [30] Yuki 90. YUKI, M., MURAYAMA, T. & Irisama, T., Temperature Gradient Sintering of psz/mo Functionally Gradient Material by Laser Beam Heating, in proceeding of The Firs International Symposium on Functionally Gradient Materials- FGM'90-Sendai –Japan, 1991, p. 203.

- [31] Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme de master « Analyse des effets de l'amplitude et température sur le comportement non linéaire d'une plaque annulaire sectorielle à gradient fonctionnel » KADOURRI Djame l El ddine .
- [32] Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme de master « Etude comportement statique des matériaux avancés FGM en utilisant la théorie de déformation en cisaillement » ITT Nadjete .
- [33] Moya. J.S., Sanchez-Herencia. A.J, Requena. J., MORENO. R.(1992), « Functionally gradient ceramics by sequential slip casting », *Materials Letters*; 14(5-6): 333-35.
- [34] Sarkar , p. Nicholson (1996) « electrophoretic deposition mechanisms, kinetics, and application to ceramics » , volume 79 N°8.
- [35] Steffens. H.D., M. Dvorak., M. Wewel, (1990). Plasma sprayed functionally gradient materials-processing and applications, in *Proceeding of The First International Symposium on Functionally Gradient Materials-FGM'90- Sendai-Japan*;139-43,
- [36] Teka 1990. Takahashi.M.itoh. Y kashiwaya fabrication and evaluation of w/cu gradient material by sintering and infiltration technique , in *proceeding of the first international symposium on functionally gradient materials Japan 1990*.
- [37] Narottam P. Bansal, Jitendra P. Singh, Jacques Lamon, Sung R. Choi , ,(2011). « Processing and Properties of Advanced Ceramics and Composites III: Ceramic Transactions » ; John Wiley & Sons; page 110, 4 août.
- [38] Texier damien, 2013: « Mesure et évolution des gradients de propriétés mécaniques dans le système superalliage à base de nickel MC2 revêtu MCrAlY », Institut national polytechnique de toulouse (INP Toulouse France).
- [39] Shen, H.-S. (2009), « Functionally Graded Materials - Nonlinear Analysis of Plates and Shells », New York: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [40] Jin. Z. H, Batra. R. C. (1996), *Journal of Thermal Stresses* 19, 317–339
- [41] Chi. Shyang-ho., Chung Yen-Ling. (2003), —Cracking in coating-substrate composites of multi-layered and sigmoid FGM coatings . *Engineering Fracture Mechanics*; 70 (10), 1227–1243.
- [42] Demasi L. (2009a), Mixed plate theories based on the Generalized Unified Formulation. Part I: Governing equations. *Compos. Struct.* 87 (2009) 1-11.
- [43] Thèse Doctorat MEKSI Rafik « Investigation sur les différents comportements mécaniques des structures en matériaux composites avancés », option : structure et matériaux 2018.