



**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL**

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

Spécialité : Génie Civil

Option : Voies et Ouvrages d'Art

Présenté par :

◆ BENAHMED Abdelkader

◆ BENCHERKI Soulimane

*Sujet du mémoire*

***INFLUENCE DE LA VARIATION DU TAUX DE  
DISTRIBUTION DE POROSITE SUR LES CONTRAINTES  
D'INTERFACE D'UNE POUTRE EN BETON RENFORCEE  
PAR UNE PLAQUE FGM***

Soutenu publiquement le 5 octobre 2020 devant le jury composé de :

Mr AIT AMAR MEZIANE. M

Président

Mr BENFERHAT. R

Rapporteur

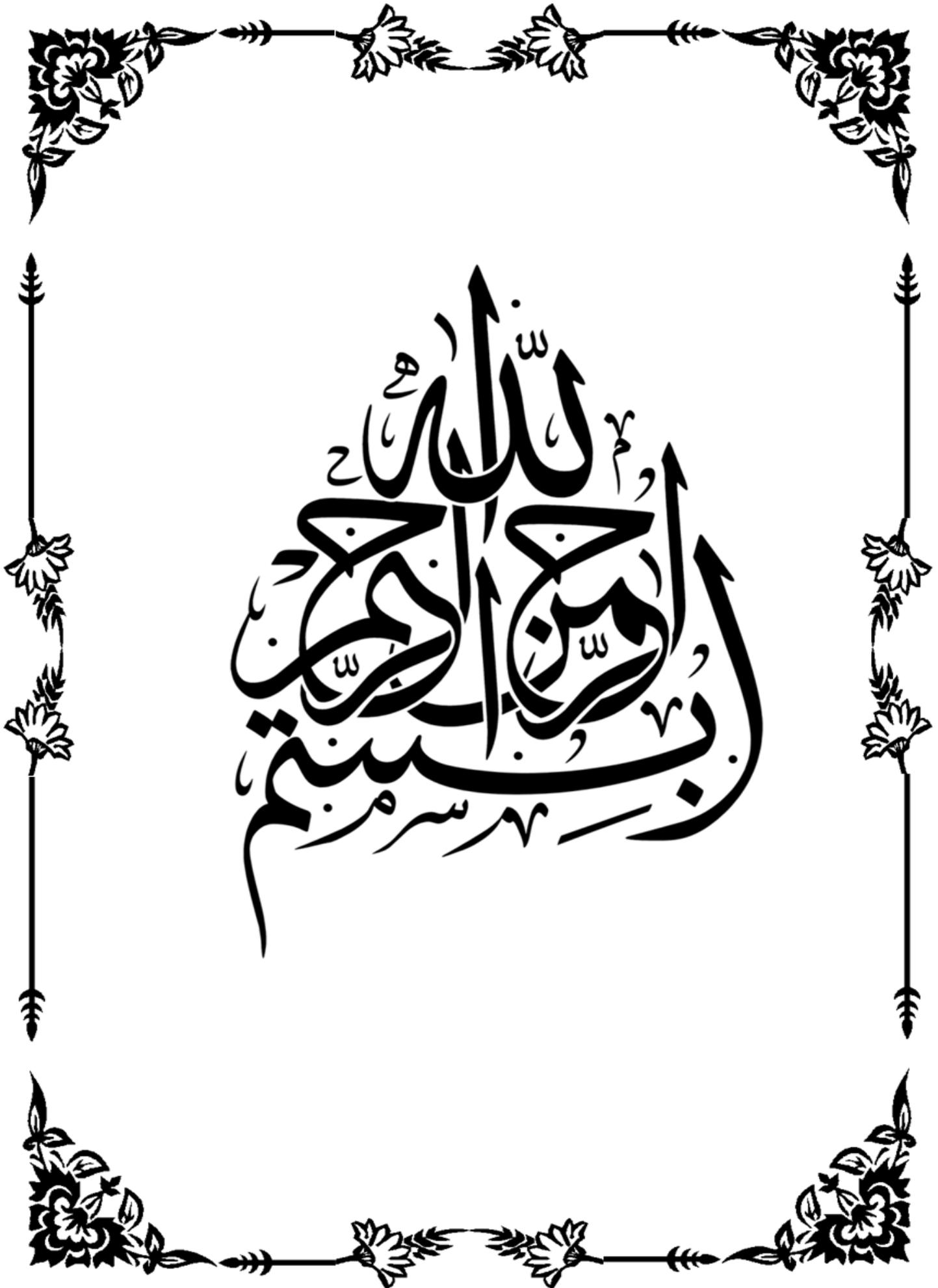
Mlle AIT YAHIA. S

Examineur

Mme KHARROUBI. L

Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



# Remerciement

(وقل ربّي زدني علما)

*A terme de notre travail nous tenons à remercier ALLAH qui donné la volonté, la force la santé...pour réalisons ce travail.*

*Nous tenons à remerciement tout spécial à mes parents, pour m'avoir soutenu et encouragé tout au long de mes études.*

*Ainsi nous remercions notre encadreur monsieur BENFERHAT rabiâ pour tous ses conseils et ses orientations de ce travail.*

*Nous voudrions aussi remercier tous les professeurs qui ont contribué à notre formation, monsieur BOUAKKAZ K chef département de génie civil et monsieur AIT AMAR MEZIANE mohamed président du jury membres du jury :Mme KHAROUBI L et Melle AIT YAHIA S trouvent ici l'expression de nos profond s respects pour avoir pré la peine d'examiner le manuscrit.*

*Nous tenons aussi à remercier aussi à toute les amies promotions de master 2 vois et ouvrage d'art et structure 2019/2020.*

*En fin nous remercions tous les personne de prés ou de loin pour leurs aide et surtout pour leurs soutient.*

BENAHMED&BENCHERKI

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents pour leur aide et soutien moral et matériel durant ce long parcours.*

*Je dédie ce fruit de longues années d'études à mes enfants BOCHRA NOUR  
IMADABDELRAHMEN ISSAMIBRAHIM et ma femme.*

*Je tiens à le dédier à toute la promotion G C 2019/2020 surtout mes amis passerelle  
ABDELKADER BOUMADIAN MOHAMED DJALOUL ABDELMALEK et*

*A tous les amis de l'université IBN KHALDOUN DE TIARET  
Amon binôme SLIMEN.*

BENAHMED ABDELKADER

## Résumé

À l'heure actuelle, le collage extérieur des plaques en matériaux composites pour réparer et renforcer les structures est l'une des méthodes modernes pour la réhabilitation des structures vis-à-vis le vieillissement, des défauts de forme ou de chargement.

Le problème principal de ce type de réparation est le détachement de la plaque de renforcement en raison de la forte concentration de pression produite par l'impact de bord.

Le but de ce travail est d'étudier l'effet du taux de distribution de porosité sur les contraintes d'interface en utilisant des lois de mélanges modifiés qui tiennent en considération les différents cas de distribution des pores entre les particules de la plaque de renforcement. Cette porosité peut se produire lors du processus de fabrication des matériaux à gradient de propriétés et qui influe sur les propriétés mécaniques des plaques de renforcement.

L'influence des paramètres tels que la fraction volumique des pores, l'indice de puissance, l'épaisseur de la plaque de renforcement et la couche adhésive sont également présentés et illustrés sous une forme numérique et graphique.

**Mots clés:** Contraintes d'interface, Lois de mélange, FGM, Porosité.

## Abstract

At present, the exterior gluing of composite material plates to repair and strengthen structures is one of the modern methods for the rehabilitation of structures against aging, deformity or loading.

The main problem with this type of repair is the detachment of the reinforcement plate due to the high concentration of pressure produced by the edge impact.

The aim of this work is to study the effect of the porosity distribution rate on the interface stresses using modified mixing laws which take into consideration the different cases of pore distribution between the particles of the reinforcement plate. This porosity can occur during the manufacturing process of materials with gradient properties and which influences the mechanical properties of the reinforcing plates.

The influence of parameters such as pore volume fraction, power law index, reinforcement plate thickness and adhesive layer are also presented and illustrated in numerical and graphical form.

**Keywords:** Interface stresses, Mixing laws, FGM, Porosity.

## ملخص

في الوقت الحاضر ، يعد اللصق الخارجي لألواح المواد المركبة لإصلاح الهياكل وتقويتها أحد الأساليب الحديثة لإعادة تأهيل الهياكل ضد الشخوخة أو التشوه الناتج عن التحميل.

المشكلة الرئيسية في هذا النوع من الإصلاح هي انفصال لوحة التسليح بسبب التركيز العالي للضغط الناتج عن تأثير الحافة.

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير معدل توزيع المسامية على ضغوط الواجهة باستخدام قوانين الخلط المعدلة التي تأخذ في الاعتبار الحالات المختلفة لتوزيع المسام بين جزئيات لوح التسليح. يمكن أن تحدث هذه المسامية أثناء عملية تصنيع المواد ذات الخصائص المتدرجة والتي تؤثر على الخواص الميكانيكية لألواح التسليح.

يتم أيضًا عرض وتوضيح تأثير عدة عوامل مثل حجم الجزئي للمسامات ، مؤشر الطاقة ، وسمك لوح التقوية والطبقة اللاصقة في شكل رقمي ورسوم بيانية.

**الكلمات المفتاحية:** ضغوط الواجهة ، قوانين الاختلاط ، FGM ، المسامية.

Titre	Page
Résumé .....	I
Abstract.....	II
ملخص .....	III
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux .....	X
Liste des notations .....	XI
Liste des abréviations .....	XII
Introduction générale.....	1
Chapitre I: Pathologies des ouvrages d'art.....	4
I.1. Introduction : .....	4
I.2. Les principales causes de dégradation: .....	4
I.2.1. causes chimiques de dégradation des bétons: .....	4
I.2.1.1. la carbonisation: .....	4
I.2.1. 2.Les causes de la corrosion: .....	6
I.2.1.3. Les conséquences de la corrosion: .....	6
I.2.1.4. L'alcali-réaction:.....	7
1.2.1.5. En France, trois types de granulats sont distingués :.....	7
1.2.1.6. Phénomène de la réaction alcali granulat RAG:.....	8
I.2.1.7. L'eau de mer: .....	9
I.2.1.8. Sels de déverglaçage: .....	10
I.2.1.9. Les désordres induits par les différents facteurs: .....	10
1.2.1.10. L'analyse de ferrailage : .....	13
I.2.2.causes physiques de dégradation des bétons:.....	14
I.2.3. Dégradation des terres:.....	14
I.2.4. Modification des conditions d'exploitation des ouvrages: .....	15
I.2.5. Pathologie d'origine mécanique:.....	15

I.2.6. L'amorçage et la propagation:.....	15
I.3. Conclusion: .....	17
Chapitre II: Différentes techniques de réparation et de renforcement.....	19
II.1. Introduction :.....	19
II.2.comportement mécanique d'une section de poutre renforcée: .....	19
II.3. Méthodes de prélèvements:.....	19
II.4.Ancrage et entraînement des armatures: .....	20
II.5.Respect des matériaux en place: .....	20
II.6. Méthodes et techniques de renforcement: .....	20
II.6.1. Méthodes de réparation non structurale:.....	21
II.6.2. Méthodes de réparation structurale:.....	21
II.6.2.1. Réparation par béton projeté:.....	21
II.6.2.2. Réparation par adjonction d'armature complémentaire: .....	22
II.6.2.3. Renforcement par collage de plats métalliques: .....	22
II.6.3. Renforcement par armatures:.....	23
II.6.4. Réparation par précontrainte additionnelle:.....	24
II.6.5. Renforcement par collage de plats composites:.....	25
II.7. Utilisation des composites <<FRP>> en génie civil : .....	26
II.7.1.Les poutres :.....	26
II.7.2. Les dalles .....	27
II.7.3. Les colonnes .....	28
II.8. Renforcement par des plaques en FRP: .....	28
II.3. conclusion .....	31
Chapitre III: Matériaux composites FRP et FGM .....	33
III.1.Introduction: .....	33
III.2. Définition d'un matériau composite:.....	33
III.3. La différence entre les matériaux composites classiques et les FGM: .....	34

III.4. Composites à matrice minérale (céramique), avec :	35
III.5. Propriétés mécaniques des composites:	36
III.6. Types de composites pour le renforcement:	36
III.7. Les matériaux à gradient de propriétés:	37
III.8. Histoire des matériaux fonctionnellement gradués (FGMs):	39
III.9. Domaines d'applications des FGM:	41
III.10. Avantages et inconvénients des FGM :	42
III.10.1. Avantages de la FGM :	42
III.10.2. Inconvénient de la FGM :	42
III.11. Différences entre matériaux à gradient de propriétés et matériaux composites traditionnels:	43
III.12. Conclusion:	43
Chapitre IV: Analyse des contraintes d'interface d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque FGM poreuse	45
IV. 1. Introduction:	45
IV. 2. Analyse théorique :	46
IV . 2.1. Equations d'élasticité:	48
IV.2.2. La distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite-poutre:	48
IV.2.3. La distribution des contraintes normales dans l'interface composite-poutre:.	51
IV.3. Résultats et discussion:	52
IV.4. Conclusion:	64
Conclusions générales	66
Références bibliographiques.	68

## Liste des figures

Figure I.1.phénomène de la carbonatation (1).....	05
Figure I.2.Cristal de portlandite en c (2) .....	05
Figure I.3.Epaufrure laissant apparaître (2).....	06
Figure I.4.Évolution de la dégradation d'une structure en béton armé (1).....	07
Figure I.5.Granulat réactif (3).....	08
Figure I.6.Gel d'alcali-réaction (3) .....	08
Figure I.7.Analyse élémentaire d'un gel (3) .....	08
Figure I.8.Phénomène d'alcali réaction RAG rencontré. (4).....	09
Figure I.9.dégradation deus à l'eau de mer (5) .....	10
Figure I.10.Corrosion par pique d'une armature due à la pénétration de chlorides (5) .....	10
Figure I.11.La stagnation des eaux dans les caves (6).....	11
Figure I.12.Etat des vides sanitaires (6) .....	12
Figure I.13.Gel interne (7).....	14
Figure I.14.Écaillage (7).....	14
Figure I.15.Dégradation de la structure du supermarché de Annaba (8).....	15
Figure I.6.Evolution du niveau de corrosion des armatures en fonction du temps (9).....	16
Figure II.1.1Prélèvements par carottage (10) .....	19
Figure II.2.réparation de poutre par béton projeté. (5) .....	22
Figure II.3.Renforcement d'un viaduc par tôles collées (5).....	23
Figure II.4.Réparation de poutre par adjonction d'armature. (11) .....	23
Figure II.5.Déférents types de réparation par précontrainte additionnelle. (5) .....	24
Figure II.6.Différentes méthode de renforcement par collage de plaques en composites (5) .....	26
Figure II.7.Systèmes de renforcement avec matériaux composites (5).....	26
Figure II.8.poutres renforcées en flexion par matériaux composites (12).....	27
Figure II.9.renforcement des poutres a l'effort tranchant (12) .....	27
Figure II.10.dalles renforcées par matériaux composite (12).....	28
Figure II.11.colonnes renforcées par matériaux composites (12) .....	28
Figure II.12.Mise en œuvre par stratification directe (11) .....	29
Figure II.13.Renforcement en flexion et de cisaillement d'une poutre en béton renforcée .....	30
Figure II.14.Opérations de chemisages des colonnes par des bandes en aramide . (11).....	30

Figure II.15. Opérations de chemisages des colonnes par des bandes en aramide . (11).....	30
Figure III.1 Structure d'un matériau composite (13). .....	33
Figure III.2. schémas illustratif d' un matériau composite. (14) .....	34
Figure III.3. Présentation d' un matériau composite. (15).....	34
Figure III.4. Classification des matériaux composites .....	35
Figure III.5. Exemple de feuille de FRP de carbone flexible pouvant être employée pour la réparation des structures en béton (11) .....	36
Figure III.6. Exemples d' armatures en FRP de verre actuellement disponibles pour le béton (11) .....	37
Figure III.7. Exemples d' armatures en FRP de carbone actuellement disponibles pour le béton (11).....	37
Figure III.8. Illustrations organiques et artificielles pour FGM (16) .....	39
Figure III.9. Illustration de la hiérarchie des matériaux composites (17).....	40
Figure III.10. des exemples d' utilisation des FGM en génie civil (14).....	41
Figure III.11. Caractéristiques des matériaux composites FGM en comparaison avec les matériaux composites conventionnels (18) .....	43
Figure V.1 Poutre simplement appuyée renforcée par des plaques en matériaux composites.	46
Figure V.2. Un segment différentiel de la poutre renforcée .....	47
Figure V.3. Variation de la contrainte normale en fonction de l'indice de puissance d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM, $\alpha=0$ .....	59
Figure V.4. Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de l'indice de puissance d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM, $\alpha=0$ .....	59
Figure V.5. Effet de porosité sur la contrainte normale en fonction de l'indice de puissance d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM, (Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).....	60
Figure V.6. Effet de porosité sur la contrainte de cisaillement en fonction de l'indice de puissance d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM, (Al/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	60
Figure V.7. Effet du taux de distribution de porosité sur la contrainte normale en fonction de l'indice de puissance d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM, (Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) , $\alpha=0.2$ .....	61
Figure V.8. Effet du taux de distribution de porosité sur la contrainte de cisaillement en fonction de l'indice de puissance d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM, (Al/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), $\alpha=0.2$ .....	61
Figure V.9. Variation de la contrainte normale en fonction de l'épaisseur de la plaque d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM, (Al/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), $\alpha=0.2$ .....	62

Figure V.10. Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de l'épaisseur de la plaque d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM,  $(Al/ Al_2O_3), \alpha=0.2$  ..... 62

Figure V.11 Variation de la contrainte normale en fonction de l'épaisseur de l'adhésif d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM,  $(Al/ Al_2O_3), \alpha=0.2$  ..... 63

Figure V.12. Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de l'épaisseur de l'adhésif d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM,  $(Al/ Al_2O_3), \alpha=0.2$  ..... 63

## Liste des tableaux

Tableau V.1 :La loi de mélange générale d'un matériaux FGM poreux et sans poreux.....	47
Tableau V.2 :Propriétés mécaniques des matériaux utilisés.....	53
Tableau V.3 :Comparaison des contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque composite et FGM. ....	54
Tableau V.4 :Effet du taux de distribution de porosité sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse .....	54
Tableau V.5 :Effet du taux de distribution de porosité ainsi que le type de la plaque de renforcement sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse ( $\alpha=0.2$ ).....	55
Tableau V.6 :Effet du taux de distribution de porosité ainsi que l'épaisseur de la plaque de renforcement sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse ( $\alpha=0.2$ ).....	55
Tableau V.7 :Effet du taux de distribution de porosité ainsi que le module d' Young du béton sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse ( $\alpha=0.2$ ). ....	56
Tableau V.8:Effet du taux de distribution de porosité ainsi le module d' Young de l'adhésif sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse ( $\alpha=0.2$ ) .....	57
Tableau V.9 :Effet du taux de distribution de porosité ainsi que la longueur de la région non renforcée sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse ( $\alpha=0.2$ ).....	57
Tableau V.10Effet du taux de distribution de porosité ainsi que le rapport $t_1/b_1$ sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse ( $\alpha=0.2$ ) .....	58

## Liste des notations

E.....	Module de Young
$E_c$ .....	Module de Young de la céramique
$E_m$ .....	Module de Young de métal
$E_1$ .....	Module de Young de la face supérieure
$E_2$ .....	Module de Young de la face inférieure
$E(z)$ .....	Module de Young en fonction de « z »
$\nu$ .....	Coefficient de Poisson
$\nu(z)$ .....	Coefficient de Poisson en fonction de « z »
$V(z)$ .....	Fraction volumique
$b$ .....	la largeur de la plaque
$h$ .....	L'épaisseur total de la plaque
$N$ .....	Efforts normaux de membrane
$M_b$ .....	Moments de flexion pure
$M_s$ .....	Moments de flexion supplémentaire due au cisaillement transverse
$S$ .....	Effort de cisaillement pur
$m, n$ .....	Nombres de mode

## Liste des abréviations

FRP	Fiber reinforced ploymer
CFRP	carbone Fiber reinforced polymer
GFRP	Glass Fiber reinforced polymer
BFRP	Boron-Fiber Reinforced – Polymer
FGM	Functionally gradedmaterial

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Depuis l'Antiquité, l'homme cherche à obtenir des installations avec une longue durée de vie. Cependant, de nombreux types de perturbations réduisent leur espérance de vie, car certaines de ces origines se fissurent ou sont sur le point de s'effondrer avant l'heure spécifiée, et cela peut être dû à un mauvais calcul ou à des défauts de résistance au cisaillement ou Flexion due à la surcharge, ainsi que celles associées à la fatigue du châssis sous diverses charges

Réparation de structures, bâtiments, routes, etc. Le béton armé Le processus est maintenant normal. Le béton reste un matériau hautement fonctionnel et utilisable, mais le nombre d'infrastructures et de bâtiments dégradés l'exige aujourd'hui L'interférence augmente constamment.

A l'interface entre la science et l'ingénierie des matériaux, les systèmes et techniques de réparation doivent être choisis dans une optique à court terme – il faut rendre à un ouvrage ses capacités originelles – mais aussi à plus long terme car ils'agit de lui assurer une nouvelle vie.

La compatibilité des produits de réparation vis-à-vis du béton ancien constitue une condition indispensable pour la qualité et la durabilité des réparations, lesquelles se mesurent notamment par l'adhérence à long terme du nouveau matériau sur l'ancien béton. Le succès avec lequel il sera possible de rencontrer les différentes exigences de compatibilité dépend de plusieurs facteurs : le choix du matériau, les opérations de préparation du support, la technique de mise en place et les opérations de contrôle de la qualité.

\* réparation : opération de remise en état d'un élément ou d'un ouvrage dégradé,

\* restauration : opération de rétablissement de l'ouvrage à son état originel, avant sa mise en service,

\* renforcement : ensemble des travaux visant à préparer l'ouvrage à une exploitation plus intensive en tenant compte des sollicitations mécaniques, thermiques ou chimiques. Chacune de ces sollicitations peut prendre un caractère permanent ou non, de courte ou de longue durée, statique ou dynamique.

- Le concept des matériaux à gradient évalués (FGM) caractérisé par une propriété sans interruption changeante due à un changement continu de la composition, dans la morphologie et effectivement dans la structure cristalline, représente un saut technologique rapide à travers les différents domaines d'application potentiels, des recherches ont été établies afin de préparer des matériaux de barrière thermique performants à longue durée de vie. Leur but principal est pour l'usage d'améliorer la résistance à l'usure ou à l'oxydation, avoir un

matériau blindé léger avec une haute efficacité balistique (navettes spatiales) et peut résister au milieu à haute température (turbomachines aéronautiques ou terrestres).

Actuellement, la plupart des activités de recherches et de développements dans les applications structurales se sont concentrées principalement sur deux secteurs de jointure de base, la céramique et le métal. Beaucoup d'avantages sont prévus d'employer cette classe de FGM, par exemple, la face avec le contenu élevé en céramique peut fournir une haute résistance à l'usure, alors que la face opposée où le contenu est élevé en métal offre la haute dureté et la force. Ainsi, de tels matériaux seront très souhaitables pour des applications tribologiques où la résistance à l'usure et la dureté élevée sont requises simultanément. Les applications balistiques de cette classe de matériaux sont également très attrayantes.

Le concept de FGM offre une méthode alternative pour concevoir une pièce bien définie, construite en état de contrainte. En adaptant judicieusement la composition et la microstructure, les contraintes thermiques peuvent être dispersées ou réduites au minimum pendant le cycle de traitement et l'utilisation en service. Alternativement, ils peuvent même être utilisés pour augmenter les performances d'une pièce, par exemple, par la génération de contraintes compressives sur la surface.

Dans cet article, nous présentons une analyse des contraintes d'interface d'une poutre en béton armé à plaque FGM

c'est l'objectif de notre étude.

Le présent mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une recherche sur les différents types de dégradations par fissuration des ouvrages en béton armé en les classant en fonction de leur origine chimique, physique ou mécanique.

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

Le troisième chapitre est une présentation des matériaux composites à base de fibres de carbone, leurs mises en œuvre, leurs principales propriétés et leur utilisation dans le domaine de génie civil.

Le quatrième chapitre est Analyse des contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par plaque FGM poreuse

Chacun de ces chapitres est terminé par une conclusion partielle, dont le bilan est effectué en conclusion générale, et qui permet d'envisager des perspectives aux travaux présentés ici.

**Chapitre I**  
**Pathologies des**  
**ouvrages d'art**

## Chapitre I: Pathologies des ouvrages d'art

### I.1. Introduction :

L'industrie a évolué au fil du temps, car les bâtiments et les travaux publics ont évolué et ont d'autres méthodes de construction et même de décoration qui n'étaient pas connues auparavant, mais il existe des projets existants jusqu'à l'heure et ces projets et même de nouveaux sont vulnérables à plusieurs maladies qui peuvent être chimiques, physiques, mécaniques ou même accidentelles en raison de Erreurs de calcul ou de conception.

Étudiez les maladies et les effets dont ils souffrent, ainsi que leurs causes et mécanismes. Cette science peut être appliquée à la construction, au génie civil, aux fondations et à toutes ses composantes.

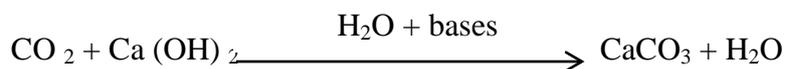
Tout correctif précède un diagnostic complet et précis de sortie nous aborderons certaines des principales maladies qui affectent les structures en béton, avec une classification en fonction de l'état chimique, physique ou mécanique.

### I.2. Les principales causes de dégradation:

#### I.2.1. causes chimiques de dégradation des bétons:

##### I.2.1.1. la carbonisation:

Comme son nom l'indique, la carbonisation est un phénomène de vieillissement naturel des matériaux à base de liant minéral qui conduisent à la formation de carbonate de calcium Par l'interaction entre les composés du ciment (étant la porcelaine) et le dioxyde. Le carbone atmosphérique ( $\text{CO}_2$ ) est présent dans l'air à 0,03% en volume. Ce taux est plus élevé dans les zones urbaines. Cette réaction conduit à la consommation des bases alcalines présentes dans solution interstitielle de béton. Il passe d'une valeur de 13 à une valeur inférieure à 9. De cette réaction ressemble à ceci: (2)



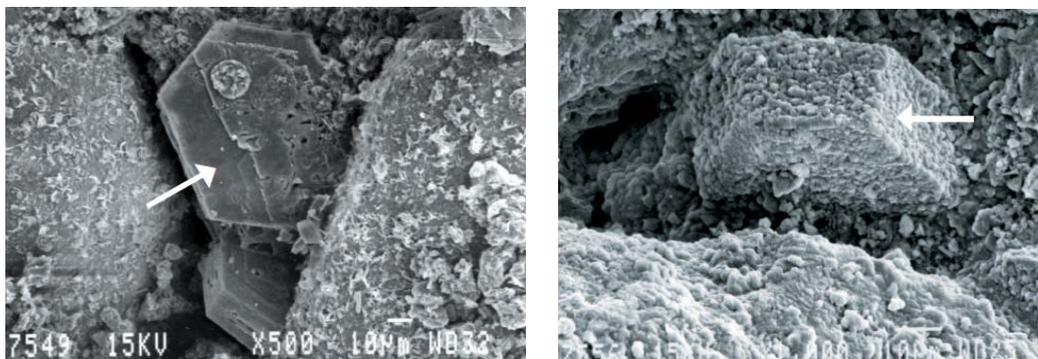


**Figure I.1.** phénomène de la carbonatation (1)

La cinétique de carbonatation de la pâte de ciment des bétons, qui évolue suivant une fonction en racine carrée du temps, est dépendante de l'humidité relative. Elle est maximale pour une humidité relative comprise entre 60 et 80 %. Au-delà de 80 %, la cinétique diminue rapidement pour atteindre des valeurs extrêmement faibles lorsque les pores sont saturés d'eau, sachant que la diffusion du  $\text{CO}_2$  dans l'eau est dix mille fois plus faible que dans l'air. A l'opposé, si un béton est placé dans un environnement très sec, la quantité d'eau présente dans les pores est insuffisante pour dissoudre le dioxyde de carbone. La cinétique de carbonatation est donc faible à très faible lorsqu'un béton est immergé ou lorsqu'il est placé dans un environnement très sec. La vitesse de carbonatation obéit à un processus de diffusion du  $\text{CO}_2$  atmosphérique à travers la couche de carbonates formée. Elle suit donc une loi linéaire en fonction de la racine carrée du temps:

$$\text{Profondeur de carbonatation} = a\sqrt{t}$$

Le coefficient dépend des paramètres de formulation du béton et de ses conditions d'exposition (humidité, température. De nombreuses lois empiriques ont été proposées pour fixer une valeur de ce coefficient en fonction des conditions d'exposition. Ces lois simples permettent d'établir une prévision approximative de l'évolution du phénomène dans le temps. (2)



**Figure I.2.** Cristal de portlandite en c (2)



**Figure 1.3.** Epaufrure laissant apparaître (2)

### **I.2.1. 2. Les causes de la corrosion:**

On distingue principalement deux facteurs favorisant l'apparition de la corrosion dans le béton armé.

Tout d'abord, il y a la carbonatation du béton, lorsque le pH du béton descend en dessous de 9 les armatures ne sont plus passivées.

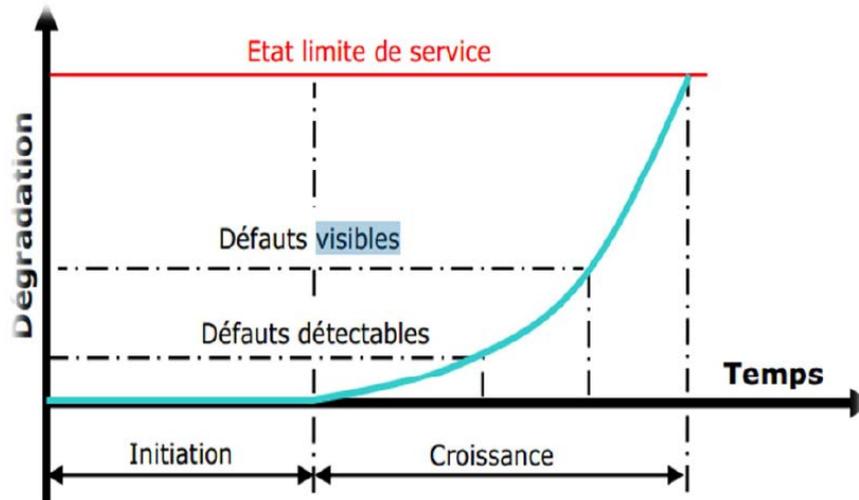
Ce phénomène est occasionné par la réaction entre les hydrates de la pâte de ciment et le CO<sub>2</sub> atmosphérique. L'autre facteur étant les chlorures, la dé passivation s'opère lorsque la teneur en chlorures au niveau des armatures dépasse un certain seuil. Il est admis que ce seuil correspond à une teneur de 0,4% par rapport à la masse du ciment. le schéma suivant décrit.

Le schéma suivant décrit le principe de corrosion dans le béton armé (1)

### **I.2.1.3. Les conséquences de la corrosion:**

La formation de la corrosion s'effectue aux dépens de métal d'origine. Ce phénomène entraîne à la fois une augmentation importante de volume ainsi qu'une perte de la section efficace de l'armature.

Cela a pour conséquences d'une part l'apparition de différentes pathologies au niveau du parement suite à l'augmentation de volume, mais aussi une perte de capacité portante due à la diminution de la section efficace. Ces pathologies peuvent être des fissures, des épaufrures, des décollements, ... (1)



**Figure I.4:** Évolution de la dégradation d'une structure en béton armé (1)

#### **I.2.1.4. L'alcali-réaction:**

Qu'est-ce que l'alcali-réaction ?

L'alcali-réaction correspond à une réaction de gonflement interne se produisant, en présence d'humidité, entre des phases minérales mal cristallisées contenues dans certains types de granulats et les alcalins présents dans la solution interstitielle du béton, fortement basique. La conjonction de trois facteurs indissociables est

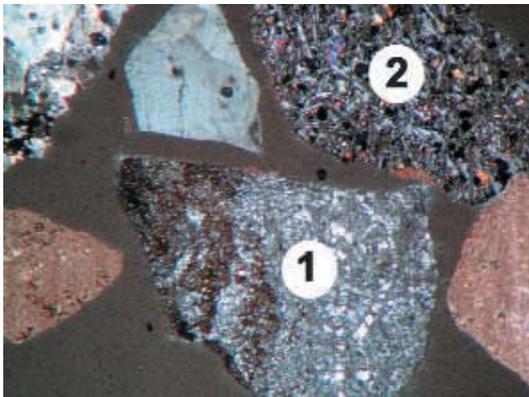
donc nécessaire à l'amorçage de la réaction :

- Facteur A : Mélange granulaire Potentiellement Réactif ;
- Facteur B : Teneur en alcalins solubles ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ), exprimé sous forme de  $\text{Na}_2\text{O}$  équivalents supérieure à un seuil critique ;
- Facteur C : Humidité relative supérieure ou égale à 80-85 % dans le béton. (3)

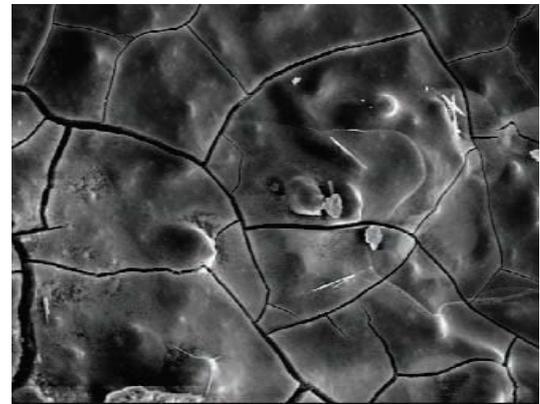
#### **1.2.1.5. En France, trois types de granulats sont distingués :**

Seuls les granulats PR peuvent, sous certaines conditions, conduire à la formation de gels expansifs. Les granulats peuvent être classés suivant la démarche proposée par le fascicule de documentation FD P 18-5421. Les alcalins, qui constituent le second paramètre important nécessaire à l'amorçage du phénomène, proviennent pour l'essentiel des constituants du béton, ciment en tête, mais peuvent aussi provenir des apports par le milieu environnant ou par éventuels traitements sur les parements en béton.

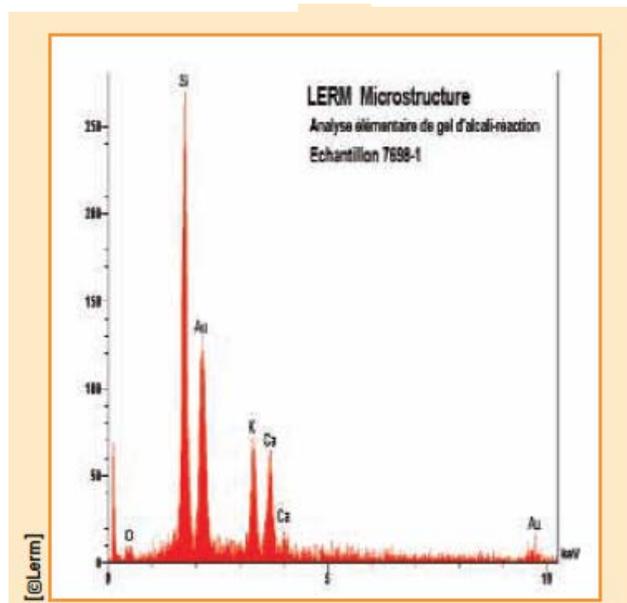
Cette réaction conduit à la formation de gels (Fig I.6 à I.8) de composition silico-alcaline pouvant développer, en fixant l'eau et le calcium présents dans la solution interstitielle du béton, des contraintes de gonflement supérieures à la résistance à la traction du béton. (3)



**Figure I.5.** Granulat réactif (3)



**Figure I.6.** Gel d'alcali-réaction (3)



**Figure I.7.** Analyse élémentaire d'un gel (3)

### 1.2.1.6. Phénomène de la réaction alcali granulat RAG:

c'est une réaction endogène «génère à l'intérieur » qui affecte le béton dans sa masse contrairement aux autres réactions.

Les mécanismes des réactions alcali granulat au sein des structures résultent, dans leur principe d'une réaction entre la phase liquide interstitielle contenant des alcalins en quantités importantes, et les particules réactives contenues dans les granulats (silice amorphe ou silicate ou même dolomite). La température et l'humidité créent un environnement propice, la fissuration en réseau est le désordre le plus fréquemment rencontré et même des faïençages

avec des mailles de petite dimension (20 à 50 mm) plus au moins grande (30 à 40 cm). Et une profondeur de fissures assez faible (quelques centimètres), plus au moins importante (supérieure à 10 cm) .

Trois types de RAG existent sont comme suit « Réaction alcali- silice ; et alcali- silicate RAS» et « Réaction alcali- carbonate RAC ». Ce type de pathologie varie selon : la teneur en granulats et leur nature; l'augmentation de la teneur en alcalis du ciment qui accélère la réaction; l'élévation de la porosité ; la température et le degré d'humidité élevée sont des paramètres qui développent le phénomène. La figure 4 montre les conséquences de réaction alcali – granulats comme les décolorations du béton dues à l'exsudation du gel, et les fissurations orientées et en réseaux, ainsi que les dilatations du béton, les auréoles, les pustules et d'autres symptômes d'ordre physicochimique et mécanique. (4)



**Figure I.8.** Phénomène d'alcali réaction RAG rencontré. (4)

#### **I.2.1.7. L'eau de mer:**

L'eau de mer de pH voisin de 8,2 et un milieu moyennement agressif pour le béton. Elle contient en efforts des chlorures, des sulfates. L'attaque est variable selon le degré d'immersion du béton dans l'eau de mer ou son exposition aux embruns:

- Parties de structure en immersion totale: l'attaque chimique est modérée pour un béton peu poreux et fabriqué avec un ciment pour travaux à la mer.
- Parties de structure en immersion alternée: différentes actions physiques se conjuguent aux attaques chimiques pour aggraver les conditions d'exposition:
  - L'érosion par les vagues et sable.
  - L'absorption et l'évaporation répétée de l'eau.
  - La cristallisation expansive des sels.
  - La fissuration due à la corrosion des armatures.



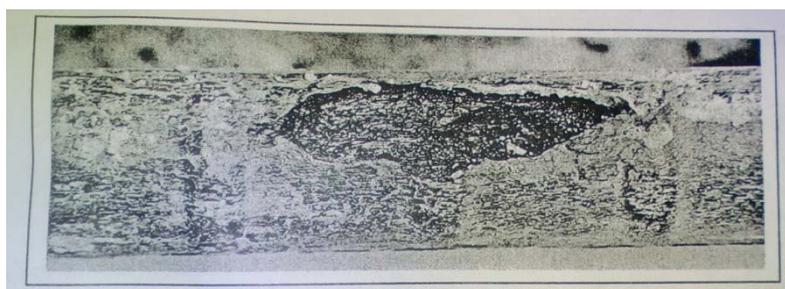
**Figure I.9.** dégradation deus à l'eau de mer (5)

En zone côtière, sur plusieurs kilomètres de profondeur (jusqu'à 50 à 60 km) suivant l'importance de vents, les embruns viennent déposer sur les parois des structures des

- agents agressifs ( $80$  à  $160 \text{ g/m}^2$  /an de sels divers) pouvant provoquer des dégradations des bétons, en particulier, à cause de la corrosion des armatures. (5)

#### **I.2.1.8. Sels de déverglaçage:**

Les sels de déverglaçages ont généralement des chlorures de calcium ou de sodium (sel de cuisine). Dissoutes dans la glace ou la neige fondue, ces substances pénètrent inévitablement dans le béton, plus ou moins rapidement et profondément. Dès que les chlorures atteignent les armatures, ils constituent un grave risque de corrosion pour celles-ci. Leurs capacité portante peut être fortement réduite ponctuellement en raison de la corrosion par piqûres induite par les chlorures (Fig I.8). Pour éviter ce type de corrosion, il faudrait utiliser des agents de déverglaçage sans chlorure, plus coûteux. (5)



**Figure I.10.** Corrosion par pique d'une armature due à la pénétration de chlorides (5)

#### **I.2.1.9. Les désordres induits par les différents facteurs:**

On remarque que les facteurs liés aux erreurs de conception jouent un rôle primordial dans l'influence sur la dégradation des ouvrages, ce qui entraîne en général des dysfonctionnements majeurs du système d'étanchéité qui se traduisent en particulier par des corrosions d'armatures et par la dégradation de certaines structures en maçonnerie.

Les dommages sur le béton non-étanche dans lequel l'eau douce (les pluies) peut s'infiltrer, elle peut extraire l'hydroxyde de calcium de la pâte de ciment durcie.

Lorsque l'hydroxyde de calcium est lessivé, le silicate de calcium hydraté (CSH) détache encore de l'hydroxyde de calcium en raison de la perte de résistance.

L'entretien a pour but d'améliorer ou maintenir la sécurité structurale et éviter ou retarder certain type de dégradation des structures, c'est vraiment un facteur négligeable, malgré qu'il soit nécessaire surtout pour certaines parties des ouvrages qui doivent être maintenues dans le temps, comme l'étanchéité, le revêtement, qui n'ont en général qu'une durée de vie limitée. L'entretien et la maintenance devront être assurés par le personnel d'exploitation, ce qu'on appelle l'entretien courant.

Dans les ouvrages à usage d'habitats, on distingue les mêmes phénomènes qui résultent de l'indifférence des habitants, prenons les phénomènes les plus rencontrés comme :

- La stagnation des eaux potables ou usées dans les caves (Figure I.12), où les pompes à eaux perdent de l'eau ;
- Les vides sanitaires sont devenus des endroits d'accumulation des eaux usées, (Photo 8) ce qui engendre des attaques chimiques par les différents produits qu'elles contiennent, comme : les graisses et huiles d'origine végétale et animale réagissent avec l'hydroxyde de calcium pour former des sels d'acides gras. L'effet de dégradation sur le béton dépend principalement de la solubilité dans l'eau des produits de réaction formés.



**Figure I.11.** La stagnation des eaux dans les caves (6)



**Figure I.12.** Etat des vides sanitaires (6)

En plus des spécifications données par le concepteur, il est important de considérer la mise en œuvre, car une mise en place incorrecte peut entraîner différents problèmes :

ségrégation, adhérence déficiente entre les différentes couches de béton, défaut de surface, dommages aux coffrages ou à l'armatures, fissuration, etc. Comme les tâches effectuées sur chantier sont nombreuses et constituent tout un enchaînement d'opération, les erreurs rencontrées sont alors classées selon l'opération à exécuter :

\* Défauts de mise en place de ferrailage :

- Non-respect des plans de ferrailage (erreurs dans la disposition des aciers), surtout pour les balcons ;
- Mauvaise disposition des armatures : soit par manque de recouvrement des armatures, car un recouvrement trop faible peut provoquer la corrosion de l'armature et l'écaillage du béton par-dessus de l'acier ;

Défauts de malaxage et coulage:

- Un malaxage trop court ;
- Un déchargement très lent des malaxeurs à tambour non inclinable qui cause la ségrégation ;
- Généralement l'équipe sur chantier essaye de couler le béton rapidement, laissant tomber librement le béton surtout lorsqu'on bétonne un élément d'une hauteur importante avec une forte densité de ferrailage, ce qui peut nuire à son homogénéité.

Défauts de vibration :

- Une vibration trop brève ou pas assez puissante peut provoquer des défauts d'homogénéité ;
- Vibration trop forte au-dessus des barres de diamètres importants placées trop près de la surface induit la fissuration précoce ;

- Une vibration excessive produira une certaine ségrégation dans la le mélange particulièrement dans les bétons assez fluides ;

Défauts de cure :

- La vitesse d'hydratation étant plus grande durant les premiers jours, c'est à ce moment qu'on a le plus besoin d'un mûrissement (cure) convenable, car l'évaporation de l'eau est très importante si la cure est inadéquate, surtout les éléments minces où le dimension de la surface exposée favorise l'évaporation.
- Normalement en climat chaud et sec, les problèmes de durabilité sont rares, et les exigences touchant à la qualité du béton y son généralement moins sévères, mais la température élevée en été a une action directe sur les ouvrages ;
- La température élevée en été influence sur la vitesse d'hydratation du ciment. Plus la température est élevée, plus la durée d'ouvrabilité et le délai de mise en œuvre du béton frais sont courts. Un bétonnage par temps chaud (température extérieure > 35°C), accélère la prise et diminue rapidement la plasticité du béton et accroît la fissuration après la mise en œuvre ;
- L'augmentation de la vitesse d'hydratation du ciment, crée des écarts de températures entre le cœur des pièces coulées et leur surface ce qui augmente la fissuration lors du refroidissement.
- Fissures dues au : retrait plastique, retrait du au séchage, différences de température et à la combinaison de ces facteurs.
- L'action de la température sur les matériaux au cours de durcissement (séchage naturel du béton) et les variations de teneur en eau entraînent des variations dimensionnelles anisotropes vraiment importantes, créant des contraintes supérieures à celles dues aux charges d'exploitation, ainsi des fissurations importantes dues au retrait de dessiccation. (6)

#### **1.2.1.10. L'analyse de ferrailage :**

Par utilisation d'un phacomètre de type Ferroskan pour déterminer les positions des armatures, leurs diamètres et mesurer l'enrobage. Le principe de ce système est basé sur la détection des diffusions des flux magnétiques émis par l'appareil et la modification des résonances induites par la présence des aciers. (4)

## I.2.2.causes physiques de dégradation des bétons:

### -Les cycles de gel-dégel:

Fissuration interne, gonflement, éclatement superficielle de la surface exposée aux sels de déverglaçage, sous forme d'écaillés.



Figure I.13. Gel interne (7)



Figure I.14. Écaillage (7)

### - Gel interne

Nécessité de réduire la distance de déplacement de l'eau non gelée pour limiter les pressions dans le béton.

- incorporation d'un adjuvant entraîneur d'air dans le béton frais pour disposer d'un réseau de bulles d'air.



## I.2.3. Dégradation des terres:

La principale cause de dégradation du sol est l'érosion. La corrosion est séparer le sol ou les fragments ou particules de roche de leur emplacement initiale par l'eau ou par d'autres facteurs géologiques tels que le vent et les vagues de la glace. L'érosion peut être d'origine géologique (érosion géologique) ou d'origine humaine (érosion accélérée ou érosion des sols). L'érosion géologique est un phénomène naturel qui a formé la surface de la Terre à travers les âges ou âge géologique. Usure accélérée ou érosion du sol due à différents types activités humaines: pratiques agricoles, foresterie, pâturages, construction de routes, construction, exploitation minière, etc.

Ajustement des phénomènes d'érosion, souvent fortement accéléré rythme. Dans la plupart des régions peuplées du monde, le phénomène d'érosion la sédimentation est fortement affectée par l'homme.

#### I.2.4. Modification des conditions d'exploitation des ouvrages:

Le développement scientifique a conduit au développement de l'industrie et du transport, ce qui a entraîné une évolution du trafic, de sorte que la durabilité de la structure doit être améliorée.

#### I.2.5. Pathologie d'origine mécanique:

**a. Les chocs :** Les désordres induits par l'exploitation d'un ouvrage constituent une cause non négligeable de dégradation du béton. Ils s'agit le plus souvent d'action accidentelle de type mécanique qui se concrétise par des chocs; les chocs le plus fréquents sont ceux des poids lourds contre les piles des ponts, les chocs des bateaux ou d'objet flottant contre les piles en rivière. Ces chocs peuvent créer d'importante éclate de béton voir même des ruptures d'acier.

**b. Incendie :** L'incendie a pour effet d'élever de façon rapide la température au sein du béton. La vaporisation brutale de l'eau se combine à une altération interne du béton pour créer des micros-fissuration et des éclatements du béton sous l'effet de la chaleur les ferrailages se dilatent et perdent une partie importante de leur résistance. la Figure I.6 dégradation de la structure du supermarché de Annaba a. Violence de l'incendie b. Eclatement de l'enrobage de la poutre et du plancher (8)



**Figure I.15:** Dégradation de la structure du supermarché de Annaba (8)

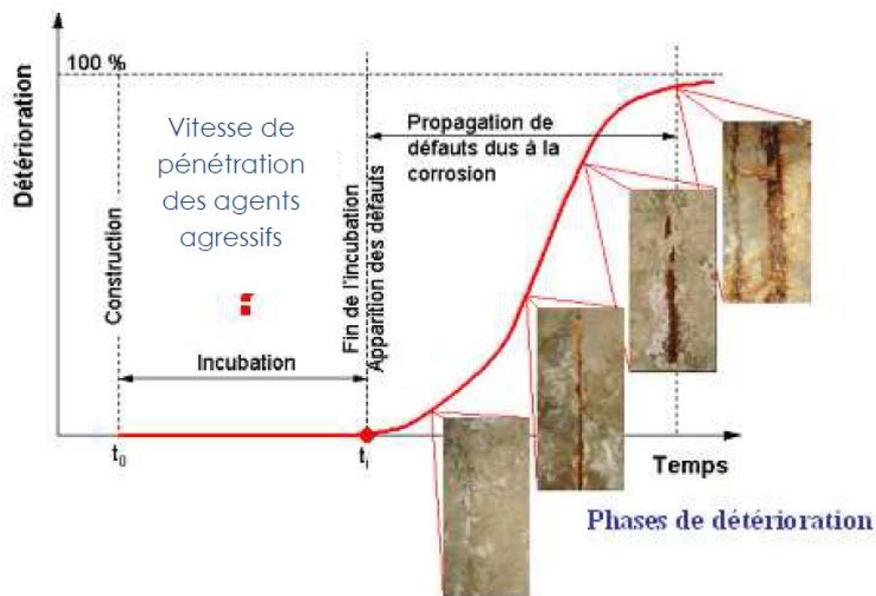
#### I.2.6. L'amorçage et la propagation:

La dégradation du béton armé comporte deux phases successives (Tutti, 1990) (voir figure I-19) :

Une phase d'incubation (dite parfois d'amorçage) qui correspond à l'altération lente du béton, due à des modifications chimiques et parfois physiques (liés à la microstructure) de l'enrobage de béton, sans aucune constatation visible à l'échelle macroscopique, cette phase

s'arrête lorsque les produits formés par les réactions internes du ciment atteignent un volume critique provoquant un gonflement néfaste du béton ou lorsque l'enrobage de béton ne protège plus les aciers contre la corrosion.

Une phase de développement (dite parfois de propagation) est celle où les dégradations du matériau sont visibles. Cependant, si l'enrobage est chimiquement modifié, l'acier se recouvre de produits "intermédiaires" qui ne sont pas stables en présence d'oxygène dissous dans le béton. Ils se transforment en des produits "finaux" non protecteurs, ce qui conduit à la dissolution et à l'enrouillèment continu de l'acier. C'est pourquoi, les dégradations par corrosion des armatures produisent des défauts qui ne deviennent visibles qu'après un certain délai.



**Figure I.16.** Evolution du niveau de corrosion des armatures en fonction du temps (9)

Bam Forth (1997) a expliqué le phénomène en proposant un modèle de propagation divisé en quatre stades (figure II-3). La corrosion démarre en un premier temps avec une dissolution des armatures qui se produit, sans aucune trace visible sur le parement, mais atteint un niveau conséquent au deuxième temps, marqué par l'apparition des fissures parallèlement au lit d'armatures longitudinales ou de la formation d'une fine couche de rouille sur l'acier avec des traces nettement visibles, la perte de section est effective au troisième stade, il s'agit aussi du début d'un éclatement (délaminage) de l'enrobage du béton, tandis que la structure perd de son intégrité au dernier temps, par la constatation de certaines dégradations pathologiques tels les éclatements, les épaufrures et des fissures avec la perte d'adhérence acier-béton. D'autres mécanismes peuvent également être à l'origine de ce type de désordres, lorsque la corrosion est très avancée, les armatures peuvent être mises à nu et leur dissolution est nettement

constatée. La durée de la phase d'initiation est primordiale pour la conservation des armatures mais reste difficile à déterminer. Par ailleurs, le béton et les ouvrages eux-mêmes doivent être conçus pour retarder ou empêcher au maximum la dépassivation des aciers. La cinétique de corrosion est influencée par de nombreux paramètres communs aux deux étapes, tels que la perméabilité du béton, l'épaisseur d'enrobage, mais aussi l'humidité relative et les effets thermiques, etc. D'autres facteurs comme les gradients de concentration qui assurent la diffusion des espèces agressives ou la capacité de fixation des ions  $Cl^-$  par les composés du ciment, sont propres à la période d'amorçage. (9)

### **I.3. Conclusion:**

La perte de performance ou de comportement de la structure en béton est causée par plusieurs facteurs. L'idée d'une structure permanente est totalement impossible. La faiblesse des structures nous oblige à utiliser la technologie de diagnostic et d'auscultation pendant le cycle de vie de la structure.

Pour ce faire, il est nécessaire de comprendre les mécanismes de dégradation ainsi que les moyens de surveiller et de découvrir les causes et les maladies.

Le béton se détériore sous l'influence de nombreux facteurs. En raison du coût des travaux de génie civil, il est important de les traiter et les renforcer afin d'augmenter leur durée de vie et c'est ce que nous aborderons dans le deuxième chapitre.

**Chapitre II:**  
**Différentes techniques**  
**de réparation et de**  
**renforcement**

## **Chapitre II: Différentes techniques de réparation et de renforcement**

### **II.1. Introduction :**

Puisqu'il est impératif que les installations (de différents types et tailles) soient infectées par la maladie, un traitement doit leur être dispensé, soit pour préserver le patrimoine, soit pour éviter des pertes importantes.

La maintenance est un ensemble d'actions ou d'interventions visant à accroître l'utilisation des installations

Ces interventions sont divisées en deux parties:

- La première section vise à maintenir la structure dans un état neuf
- La deuxième section vise à renforcer

Le processus de maintenance se fait soit en ajoutant des forces (en cas de contrainte supplémentaire), soit en ajoutant des matériaux (plaques métalliques revêtues de béton)

### **II.2.comportement mécanique d'une section de poutre renforcée:**

### **II.3. Méthodes de prélèvements:**

Des prélèvements sont effectués, si nécessaire, dans des zones représentatives des états de dégradation, par carottage ou forage. Une procédure AFREM donne des indications sur ce point.

Le forage est utilisé, par exemple, pour estimer la pénétration des chlorures. Dans ce cas, il concerne des profondeurs successives, de l'ordre du centimètre. Figure II.1 (10).



**Figure II.1.** Prélèvements par carottage (10)

#### **II.4. Ancrage et entraînement des armatures:**

Les oxydes de fer forment autour des armatures une gaine qui, à partir d'une certaine importance, peut diminuer leur adhérence au béton. Cette perte d'entraînement des barres conduit alors à une perte générale de la résistance de la structure. La mobilisation des efforts par les barres en traction peut être modifiée par un glissement relatif de l'ancrage lors de sollicitations, la mobilisation des efforts se fait alors avec de plus grandes déformations. Il faut alors quelquefois dégarnir les enrobages de béton altérés pour les reconstituer, ces opérations libèrent totalement les ancrages de barres. Quand ils ne sont pas accompagnés d'un étaie soigné de la structure avant le repiquage, ces dégarnissages modifient profondément son fonctionnement, et peuvent présenter un réel danger lors de l'exécution. (10)

#### **II.5. Respect des matériaux en place:**

Les traitements de corrosion des armatures du béton armé sont réalisés soit par des apports de matériaux en surface, soit par des reconstitutions de forme après purge, soit par des procédés agissant en profondeur. Le choix des techniques doit être fait en considérant les matériaux constitutifs de la structure, tant sur un plan physique que chimique. Ainsi, le traitement de la corrosion des armatures ne doit pas entraîner une dégradation du béton en place, qui serait due à l'incompatibilité de deux produits en présence. L'action des produits de protection des armatures ne doit pas engendrer, vis-à-vis du béton, des actions secondaires préjudiciables au bon fonctionnement de la structure. (10)

#### **II.6. Méthodes et techniques de renforcement:**

Le choix de la méthode de réparation et des matériaux à mettre en ouvrage est définie en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, en tenant compte des critères économique des matériaux de construction, des conditions de chantier et des contraintes de site. Le principe de renforcement ou de réparation consiste en adjonction de matière dans les zones ou les sections sont trop sollicitées. Une section devient trop sollicitée si, du fait même des dispositions adoptées ou du changement des conditions d'exploitation, les efforts appliqués sont supérieurs à ceux pris en compte dans les calculs (problème de renforcement), ou bien si la résistance a diminué par suite de dégradation (problème de la réparation). (5)

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

Parmi les intervention de maintenance, on peut distinguer:

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

Selon les cas étudiées, il est nécessaire de faire intervenir la notion de protection de l'ouvrage visant à assurer par exemple de fonction d'étanchéité ou à limiter les phénomènes de corrosion, la notion réparation visant à restituer les caractéristiques initiales de portance (rigidité – résistance) et éventuellement, la notion de renforcement ayant pour objectif d'améliorer les performances de la structures vis-à-vis de condition d'exploitation modifiées ou d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage. Différentes méthodes et techniques de renforcement des ouvrages sont couramment utilisées depuis de nombreuses années. (5)

### **II.6.1. Méthodes de réparation non structurale:**

Des solutions de réparation graduelles peuvent être envisagées. Lorsque les désordres sont peu importants, des méthode non structurales sont utilisées. Ces technique de réparation dites <<légères>> consistent en une reprise du béton dégradé par ragréage ou injection.

Le traitement du béton peut faire l'objet d'opération de ragréage par application de couches de peinture ou de mortier hydraulique ou polymérique après traitement de la poutre dégradée. La réparation par injection des fissures se fait bien évidemment à l'aide de produits aux caractéristique bien définies et contrôlées, les conditions de mise en œuvre des produits de ragréage sont précisées dans la norme NF P 95-101. (5)

### **II.6.2. Méthodes de réparation structurale:**

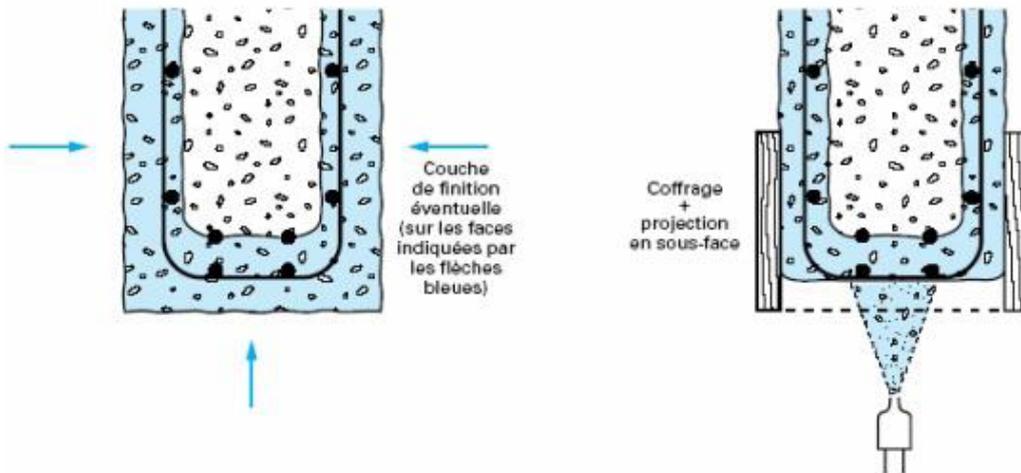
Les réparations et/ou renforcement structuraux des ouvrage en béton armé peuvent être effectués soit par ajout de fors (cas de précontrainte additionnelle), soit par ajout de matière (béton projeté, adjonction d'armature complémentaire et renfort collés (plaques d'acier ou composites). (5)

#### **II.6.2.1. Réparation par béton projeté:**

Cette technique, très au point, utilisée tant pour le renforcement de structure insuffisantes ou défaillantes que pour la réparation d'ouvrage endommagés, exige pour sa mise ouverte un personnel spécialisé. Le béton peut être, ou non, combine avec l'adjonction d'armatures complémentaires. Après durcissement. Le béton projeté possède le propriétés d'un béton

coulé, puis vibré. La projection est possible dans toutes les directions, en particulier en plafond (figure II.2). (5)

Les travaux de réparation par béton projeté se regroupent en deux catégories:



**Figure II.2:** réparation de poutre par béton projeté. (5)

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

La difficulté de l'emploi de cette méthode provient essentiellement du mode d'application et de mise en œuvre (matériels, main d'œuvre et problèmes d'hygiène et de sécurité). (5)

### II.6.2.2. Réparation par adjonction d'armature complémentaire:

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupés accidentellement ou lorsqu'il s'agit de renforcer une structure. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration; et participer à la résistance des sections renforcées. La protection de ces armatures est assurée par un soigneusement les ancrages et de déterminer le chemin approprié des câbles. Ainsi des forages à travers certaines parties de la structure existante sont nécessaires. Ces forages doivent être exécutés sans toucher aux différentes armatures existantes. Enfin il faut s'assurer que la précontrainte additionnelle se répartisse dans la structure et surtout dans les zones fissurées. (5)

### II.6.2.3. Renforcement par collage de plats métalliques:

Le renforcement de structure par plats métalliques, mieux connus sous le nom de procédé l'Hermite, consiste à coller des plats en acier sur les faces tendues de structures en béton

armé (figure 1.4). Ce procédé consiste en un apport d'armature extérieures soit pour consolider un élément dont les dégradations mettent en péril la résistance, soit pour remplacer des aciers oubliés ou mal positionnés.

Ainsi, L'Hermite s'est intéressé, dès les début des années soixante, à l'utilisation des composés adhésifs de type époxy polymérisant à froid pour associer béton et acier.

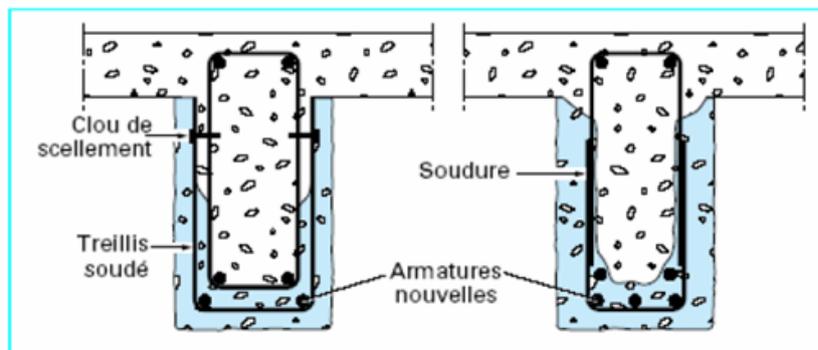
En effet, cette technique a été particulièrement étudiée par L'Hermite et Bresson [Bresson J. 1971] afin d'assurer la réparation et le renforcement de structures en béton armé présentant des insuffisances à la flexion et s'est développées suite à l'apparition sur le marché de colles en particulier des résines époxy possédant des caractéristiques d'adhésion élevées, susceptibles de transmettre des efforts non négligeables. (5)



**Figure II.3.** Renforcement d'un viaduc par tôles collées (5)

### II.6.3. Renforcement par armatures:

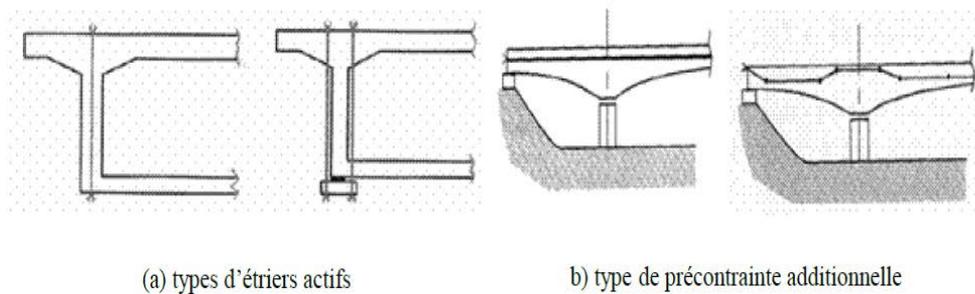
Selon la figure II.6, la protection de ces armatures est assurée par un béton coulé ou projeté et leurs jonctions avec les armatures existantes, peut se faire par des procédés classiques (recouvrement, soudure, manchonnage). (11)



**Figure II.4.** Réparation de poutre par adjonction d'armature. (11)

#### II.6.4. Réparation par précontrainte additionnelle:

Contrairement aux techniques présentées ci-dessus qui consistent en l'ajout de matière (béton ou acier), la précontrainte additionnelle consiste en un ajout de force dans des ouvrages existants en vue soit de leur redonner leur état de service initiale, soit de leur donner un nouvel état de service. Elle permet, en effet, d'appliquer des efforts d'une intensité connue, en des points et suivant des directions bien définies, capables de s'opposer aux efforts générateurs des désordres. Elle est réalisée le plus souvent par la mise en œuvre d'armatures de précontrainte (câbles ou barres). La précontrainte additionnelle peut être employée pour traiter une grande variété d'ouvrages (pont, barrages, réservoirs, bâtiments). Cette méthode est particulièrement adaptée au renforcement en flexion et vis-à-vis de l'effort tranchant par l'emploi d'étriers actifs (figure II.7)



**Figure II.5:** Différents types de réparation par précontrainte additionnelle. (5)

Cette méthode de renforcement bien que très efficace présente quelques difficultés de mise en œuvre. En effet, elle nécessite de dimensionner.

Pour que l'adhérence entre l'acier et la colle ait une bonne tenue, les tôles utilisées doivent subir toute leur préparation en usine (découpage, sablage...).

La réparation ou le renforcement par les tôles collées est aujourd'hui une technique maîtrisée et parfaitement au point, cependant elle présente aussi quelques difficultés:

- Sensibilité de l'acier à l'oxydation (corrosion), nécessitant une protection et un entretien quotidien (peinture anti-corrosive).
- Impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction ces tôles, même sous faible épaisseur.
- Nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine.
- Impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masse manipulées trop importantes), ce qui limite d'autant la possibilité de réparation.

C'est pourquoi la recherche s'est orientée vers les matériaux composites, moins lourds, plus performant mécaniquement, plus facile à mettre en œuvre et pour les quels le problème de la corrosion ne pose pas. (5).

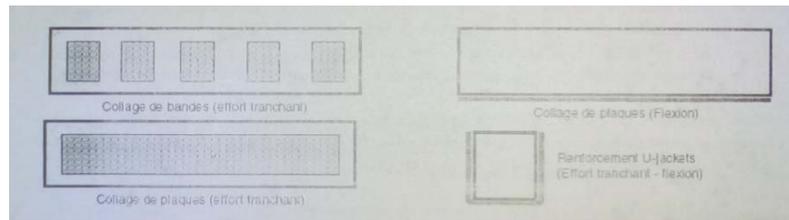
### **II.6.5. Renforcement par collage de plats composites:**

Il a été mentionné, en introduction générale, que les enjeux économiques ont été à l'origine de la prise de conscience de l'importance de la maintenance et, ainsi, au développement des techniques de renforcement et/ou réparation. Les techniques traditionnelles ont montré leurs limites au comportement à long terme (oxydation des tôles d'acier, durabilité du béton projeté, etc.). En même temps, la rentabilité d'une opération de maintenance est conditionnée par sa durabilité, et donc par la baisse des fréquences d'intervention. La recherche dans le domaine de renforcement s'est orientée vers l'utilisation de nouveaux matériaux capables de répondre aux différents critères exigés par les opérations de la maintenance des ouvrages.

Les matériaux composites, restés longtemps limités aux industries aéronautique, spatiale, aéronautique et de transport, ont pu s'introduire dans le domaine du génie civil en raison du développement qu'a connu cette industrie et la baisse des prix des composites qui ne peut plus être considéré comme un frein surtout aux applications de réparation et de renforcement.

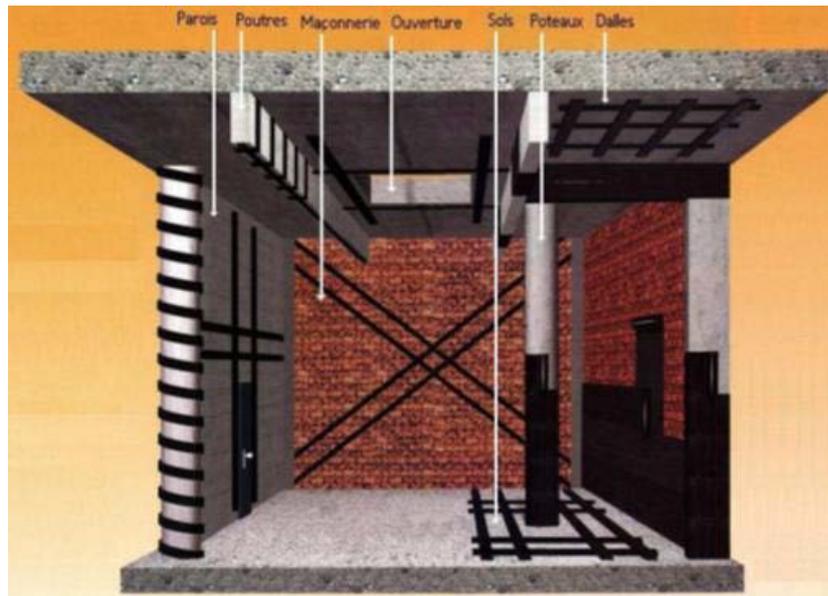
Ainsi, l'amélioration de la durée de vie de l'ouvrage est due aux propriétés des composites: la rigidité (pour les fibres en carbone), la résistance mécanique, la résistance à la corrosion et l'étanchéité. Un autre avantage considérable des matériaux composites est la grande souplesse d'utilisation, puisque les taux de fibres, leur structure, leur orientation et le nombre de plis sont ajustables. Le caractère directionnel des renforts induit de fait une anisotropie des propriétés mécaniques. On obtient ainsi, suivant la direction et le type de composite des modules longitudinaux compris entre 10 et 200 GPa et une résistance variant entre 100 et plus de 1000 MPa. Les matériaux composites utilisés en génie civil sont essentiellement des composites carbone-époxyde ou verre-époxyde. Leurs performances mécaniques spécifiques sont en effet supérieures à celles de l'acier, principalement la résistance à la traction et en compression. Ils se présentent, généralement, sous la forme de tissus ou de plaques stratifiées préalablement fabriquées. Aujourd'hui, plus de vingt ans après, la recherche s'intensifie dans ce domaine, et les applications de ces matériaux dans le génie civil se diversifient.

La figure II.6 présente différentes configurations de collage de matériaux composites sur une poutre, chaque configuration est prévue pour un objectif particulier et la figure 1.6 montre le renforcement de structures au moyen de composites préfabriqués. (5)



**Figure II.6:** Différentes méthode de renforcement par collage de plaques en composites

(5)



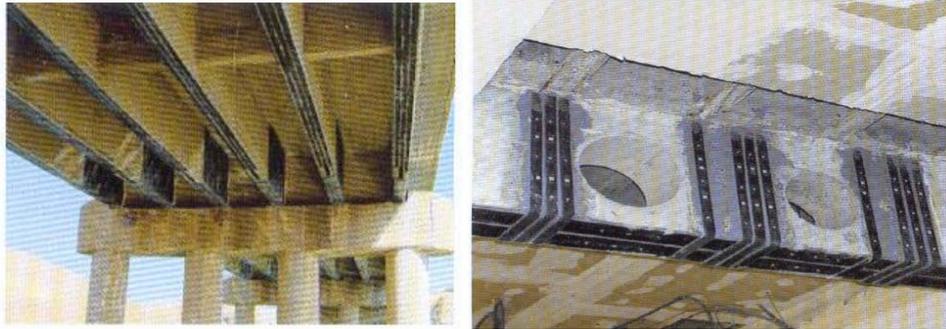
**Figure II.7:** Systèmes de renforcement avec matériaux composites (5)

## II.7. Utilisation des composites <<FRP>> en génie civil :

### II.7.1. Les poutres :

Le renforcement vis-à-vis la résistance à la flexion d'une poutre en béton armé simplement appuyée en utilisant les composites FRP est généralement réalisé en liant une plaque FRP à l'intrados de la poutre concernée [58, 64]. Avant l'application de la plaque FPR, l'intrados de la poutre en béton armé doit être préparé. Le but de la préparation d'une surface adéquate est d'enlever la couche faible de la surface du béton, exposé la totalité du béton pour améliorer la liaison avec le FRP, et fournir une surface uniforme.

Les plaques FRP peuvent être préfabriquées, dans ce cas quelques préparations de la surface de liaison de cette dernière peuvent être nécessaires. D'autre part, la plaque FRP peut être construite sur place par un procédé de stratification direct. Il y a plusieurs variations de la procédure de base. Ceux-ci incluent la précontrainte de la plaque, et la prévision d'ancrages tel que les bandes en U aux fins de la plaque pour réduire le risque des ruptures par décollement [3, 57, 40]



**Figure II.8.** poutres renforcées en flexion par matériaux composites (12)

Dans ces applications, les FRP sont installés le long des poutres (d'une manière similaire à celles des armatures longitudinales) avec des bandes en U pour assurer l'ancrage. (12)



**Figure II.09.**renforcement des poutres a l'effort tranchant (12)

Le renfort vis – vis l'effort tranchant peut être placé sous forme de bande de renforcement individuelles, parfois des trous sont réalisés dans la dalle afin que le renforcement enveloppe la section entière de la poutre. (12)

### II.7.2. Les dalles

La procédure de base de renforcement des dalles par FRP est de coller des bandes ou des lamelles FRP sur la face tendue de la dalle. Pour les dalles travaillantes dans les deux sens, on utilise des lamelles croisées. (12)



**Figure II.10.** dalles renforcées par matériaux composite (12)

### II.7.3. Les colonnes

Plusieurs techniques différentes ont été développées pour renforcer ou réhabiliter des colonnes existantes en béton armé en utilisant des composites FRP. Une colonne peut être enveloppée complètement par des tissus FRP avec ou plusieurs couches. Elle peut être aussi partiellement enveloppée en utilisant des bandes FRP sous forme de spirale continue ou des anneaux discrets. (12)



**Figure II.11.** colonnes renforcées par matériaux composites (12)

### II.8. Renforcement par des plaques en FRP:

Les techniques traditionnelles ont montré leurs limites au comportement à long terme (oxydation des tôles d'acier, durabilité du béton projeté, etc.). La recherche dans le domaine de réhabilitation s'est orientée vers l'utilisation de nouveaux matériaux capables de répondre aux différents critères exigés par les opérations de la maintenance des ouvrages. Plusieurs raisons ont permis aux matériaux composites, restés longtemps limités aux applications militaires et à l'industrie aéronautique, de s'implanter dans le domaine de génie civil. Le génie civil est un domaine qui nécessite trop de main d'œuvre, le coût de cette main d'œuvre

dans les pays développés est devenu assez élevé de telle sorte que le prix de la matière première ne joue plus le rôle du critère économique primordial.

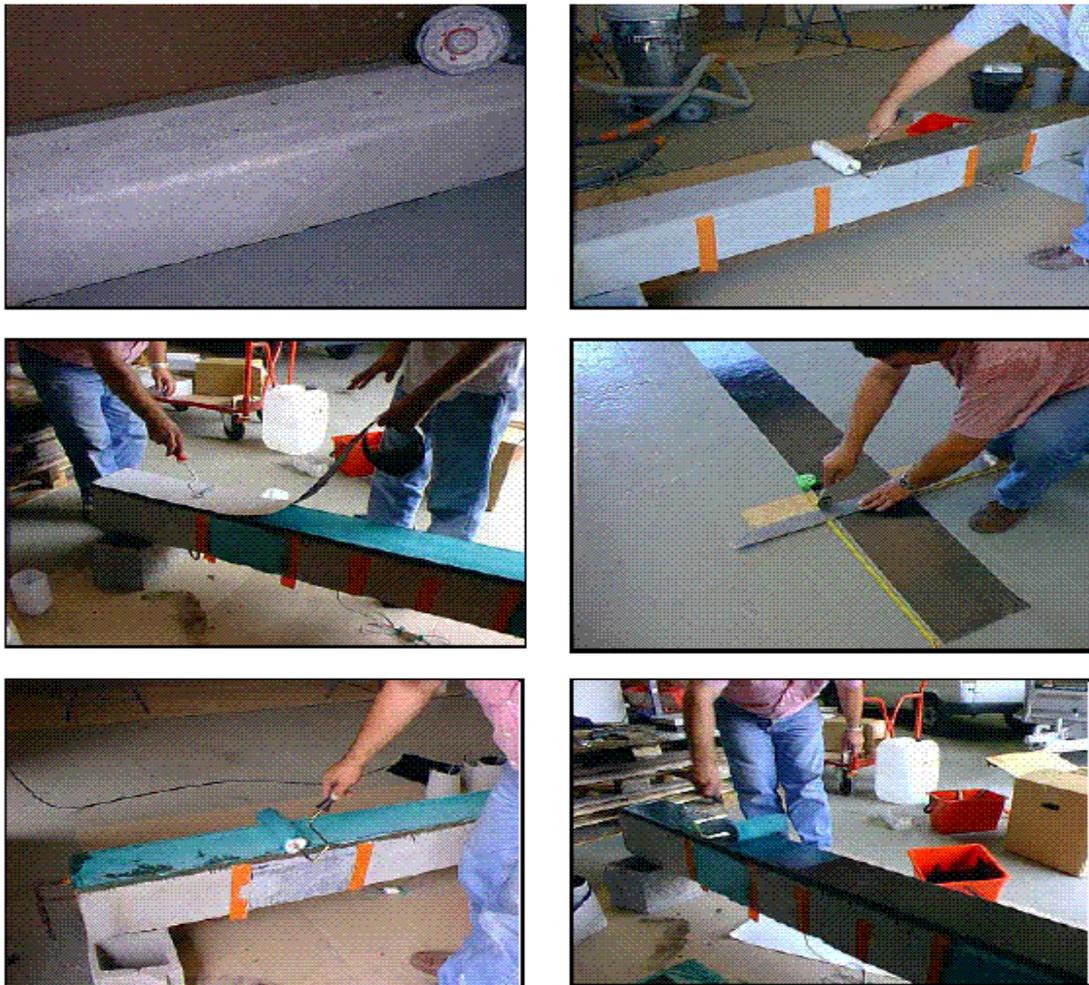
Le renforcement de structures par plaques ou tôles en composites se fait directement par la pose de ce dernier sur une couche de résine qui recouvre l'élément à renforcer et qui sert de liant. Après marouflage, une couche de résine de fermeture permet de parfaire l'imprégnation.

Les pressions nécessaires appliquées pour cette méthode de renforcement sont faibles par rapport à d'autres méthodes de renforcement. En utilisant des polymères qui polymérisent à température ambiante, il est possible de réaliser une stratification directe, en respectant les

étapes suivantes (figure II.13) :

Préparation de la surface, application de la couche primaire, application d'une première couche de polymère époxyde,

- Application d'une première couche de tissus secs,
- Application d'une seconde couche de polymère époxyde, protection, finition. (11)

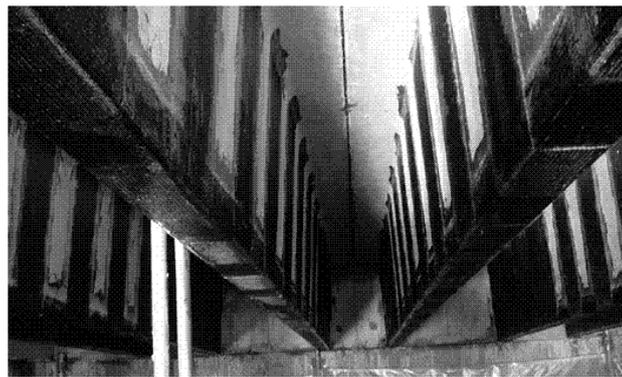


**FigureII.12.** Mise en œuvre par stratification directe (11)

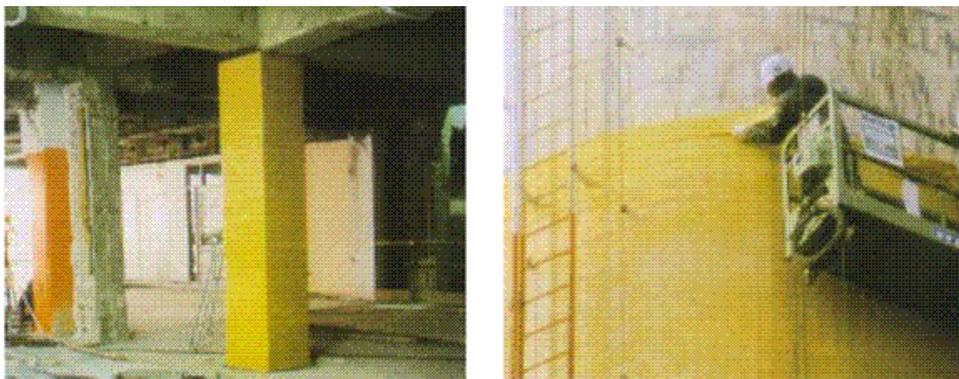
Ce procédé présente l'avantage d'une mise en œuvre simplifiée, mais le renforcement requiert toute sa résistance au bout d'une semaine et le contrôle de la qualité de l'application doit être soigné suivant les conditions de mise en œuvre. Ce procédé a trouvé de nombreuses applications en Europe, au Japon et aux Etats-Unis (figure II.13-II.15). (11)



**Figure II.113.** Renforcement en flexion et de cisaillement d'une poutre en béton renforcée par des plaques en composite . (11)



**Figure II.14.** Opérations de chemisages des colonnes par des bandes en aramide . (11)



**Figure II.15.** Opérations de chemisages des colonnes par des bandes en aramide . (11)

### **II.3. conclusion**

Ce chapitre est consacré à la lutte contre les principales causes de détérioration et de perturbation des ouvrages de génie civil. Comprendre les causes des troubles facilite le meilleur choix de méthode de renforcement ou de rééducation. Ainsi, la durée de vie maximale peut être obtenue.

Des dommages importants peuvent être causés par des mesures accidentelles telles que Tremblement de terre, choc et incendie. Procédures chimiques, différence de température, retrait, nivellement différentiel, le gel-dégel et la fatigue des matériaux sont également des causes qui conduisent à une détérioration importante des structures. De plus, des erreurs de conception, lors des calculs ou lors de la construction, peuvent le faire.

La demande croissante de matériaux composites est populaire pour son propre usage. Il a répondu en promouvant et en réparant les ouvrages de génie civil. Ces substances ont de meilleures propriétés mécaniques et physiques.

**Chapitre III:**  
**Matériaux composites**  
**FRP et FGM**

## Chapitre III: Matériaux composites FRP et FGM

### III.1.Introduction:

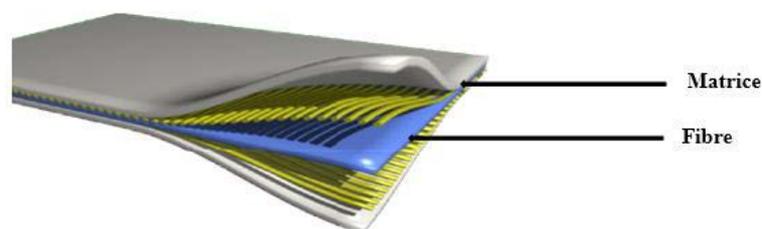
L'intérêt pour les matériaux composites a augmenté ces dernières années en tant que matériau d'ingénierie en raison de ses propriétés uniques et de cette forme de réalisation intéressante. Ces matériaux ont fait leurs preuves dans les secteurs de l'aérospatiale, du transport, civil, militaire et industriel.

Il existe de nombreux exemples de matériaux composites, du bouclier utilisé dans les guerres anciennes à la fin des applications modernes. Dans les pneus de voiture et les pièces de luxe comme les bateaux de pêche, les tubes en plastique etc.

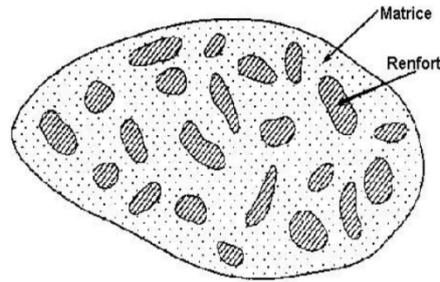
### III.2. Définition d'un matériau composite:

Un matériau composite est tout alliage ou matière première comportant un renfort sous forme Filamentaire. Il nécessite l'association intime d'au moins deux composants : le renfort (le fibre) et La matrice (Figure III.1), qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison, l'interface.

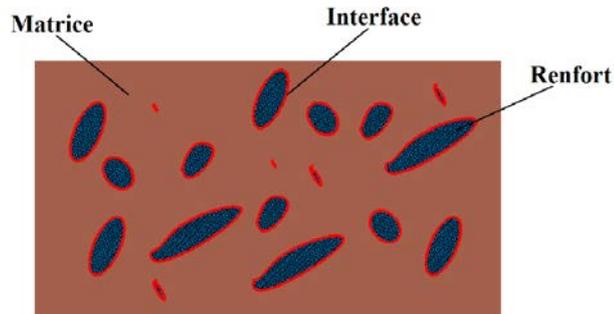
Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou Plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun Des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des Arrangements de fibres, les renforts qui sont noyés dans une matrice dont la résistance mécanique Est beaucoup plus faible. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet Egalement de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces (13).



**Figure.III.1:**Structure d'un matériau composite (13)



**Figure. III.2:** schémas illustratif d'un matériau composite. (14)



**Figure III.3.** Présentation d'un matériau composite. (15)

### III.3. La différence entre les matériaux composites classiques et les FGM:

Les propriétés supérieures de matériaux composites avancés, telles que la résistance spécifique et la rigidité élevée, ont conduit à leur utilisation généralisée dans les avions à haute performance, astronefs, des pièces automobiles et des structures spatiales. Dans les structures classiques de composites stratifiés, lames élastiques homogènes sont liés ensemble pour obtenir des propriétés mécaniques et matérielles améliorées. Les matériaux composites sont fabriqués par l'homme et, par conséquent, les constituants des matériaux composites peuvent être sélectionnés et combinés de manière à produire un matériau utile qui a les propriétés souhaitées, tels que la haute résistance, une rigidité élevée, une plus grande résistance à la corrosion, une plus grande résistance à la fatigue, un faible poids et ainsi de suite.

La constitution d'anisotropie des structures composites stratifiées souvent se traduit par une concentration de contraintes dans les matériaux et des discontinuités géométriques, figure III.3, qui peut conduire à des dommages sous la forme de délaminage, la fissure de la matrice et la séparation des assemblages.

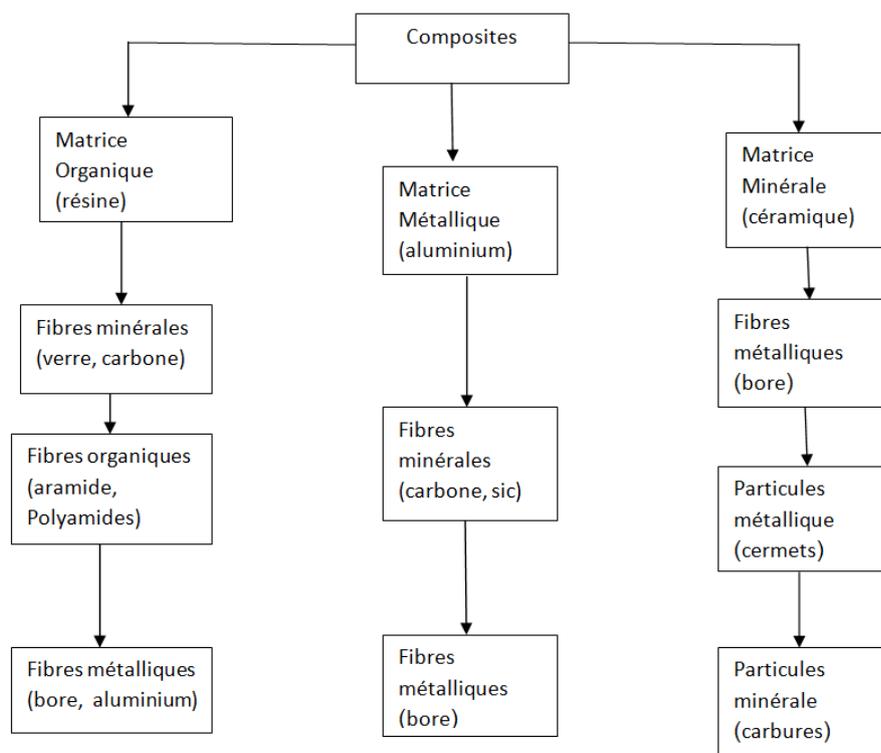
Les matériaux à gradient de propriétés (FGM) sont une classe de composites qui ont une variation continue des propriétés des matériaux d'une surface à une autre et alléger ainsi les concentrations de contraintes trouvées dans les composites stratifiés.

La gradation des propriétés du matériau réduit les contraintes thermiques, les contraintes résiduelles et les facteurs de concentration de contrainte. La variation progressive dans un matériau est très efficace elle est adaptée pour répondre aux besoins de la structure. Les FGM sont généralement fabriqués à partir de composants d'isotropie tels que des métaux et des céramiques, puisqu'ils sont utilisés aussi comme structures de barrière thermique dans des environnements avec des gradients thermiques sévères (par exemple des dispositifs thermoélectriques pour la conversion de l'énergie, l'industrie des semi-conducteurs). Dans de telles applications, la céramique présente une résistance à la chaleur et à la corrosion;

#### III.4. Composites à matrice minérale (céramique), avec :

- Des fibres métalliques : bore,
- Des particules métalliques : cermets,
- Des particules minérales : carbures, nitrures, etc.

Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans le domaine des températures ne dépassant pas 200 à 300 °C, alors que les Matériaux composites à matrices métallique ou minérale sont utilisés au-delà : Jusqu'à 600 °C pour une matrice métallique, jusqu'à 1000 °C pour une matrice Céramique. Les matériaux composites se divisent en 3 familles principales comme montrer au-dessous (fig.III.8)



**Figure.III.4** : Classification des matériaux composites

### III.5. Propriétés mécaniques des composites:

Dans le composite, les fibres peuvent être placées dans une seule direction et dans ce cas le composite est unidirectionnel. Elles peuvent aussi être collées dans deux ou plusieurs directions et le composite devient bi ou multidirectionnel. Les plus répandus dans le renforcement sont les composites unidirectionnels.

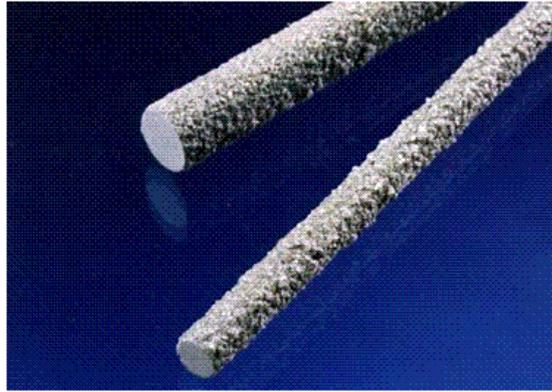
Les matériaux composites ne sont pas homogènes. Leurs propriétés mécaniques dépendent entre autres, des fibres, de la matrice, de la quantité des fibres (fraction volumique) et de la configuration du renforcement. Si toutes les fibres sont alignées dans la même direction, le composite est relativement rigide et solide dans cette direction. Mais dans la direction transversale, il a un faible module et une faible résistance. La résistance et le module d'Young des fibres sont plus importants que ceux de la matrice, ce qui confirme le fait que le comportement mécanique du composite dépend essentiellement des propriétés mécaniques des fibres et de la qualité des fibres ou encore de la fraction volumique des fibres. (12)

### III.6. Types de composites pour le renforcement:

Depuis le début des années 90, l'intérêt pour l'utilisation des matériaux de FRP pour les structures a grandement augmenté et il y a actuellement des centaines de structures en service incorporant des FRP à travers le monde. Quelques-unes des utilisations les plus fréquentes des FRP dans les structures en génie civil sont les plaques ou feuilles de FRP (figure. III.9) collées extérieurement pour le renforcement des éléments structuraux en béton armé (aussi en acier, en aluminium et en bois), des barres ou tiges de FRP pour le renforcement interne du béton (figures. III.10 et III.11), des structures constituées uniquement de FRP et enfin des structures composites hybrides en FRP (11).



**Figure III.5 :** Exemple de feuille de FRP de carbone flexible pouvant être employée pour la réparation des structures en béton (11)



**Figure III.6 :** Exemples d'armatures en FRP de verre actuellement disponibles pour le béton (11)



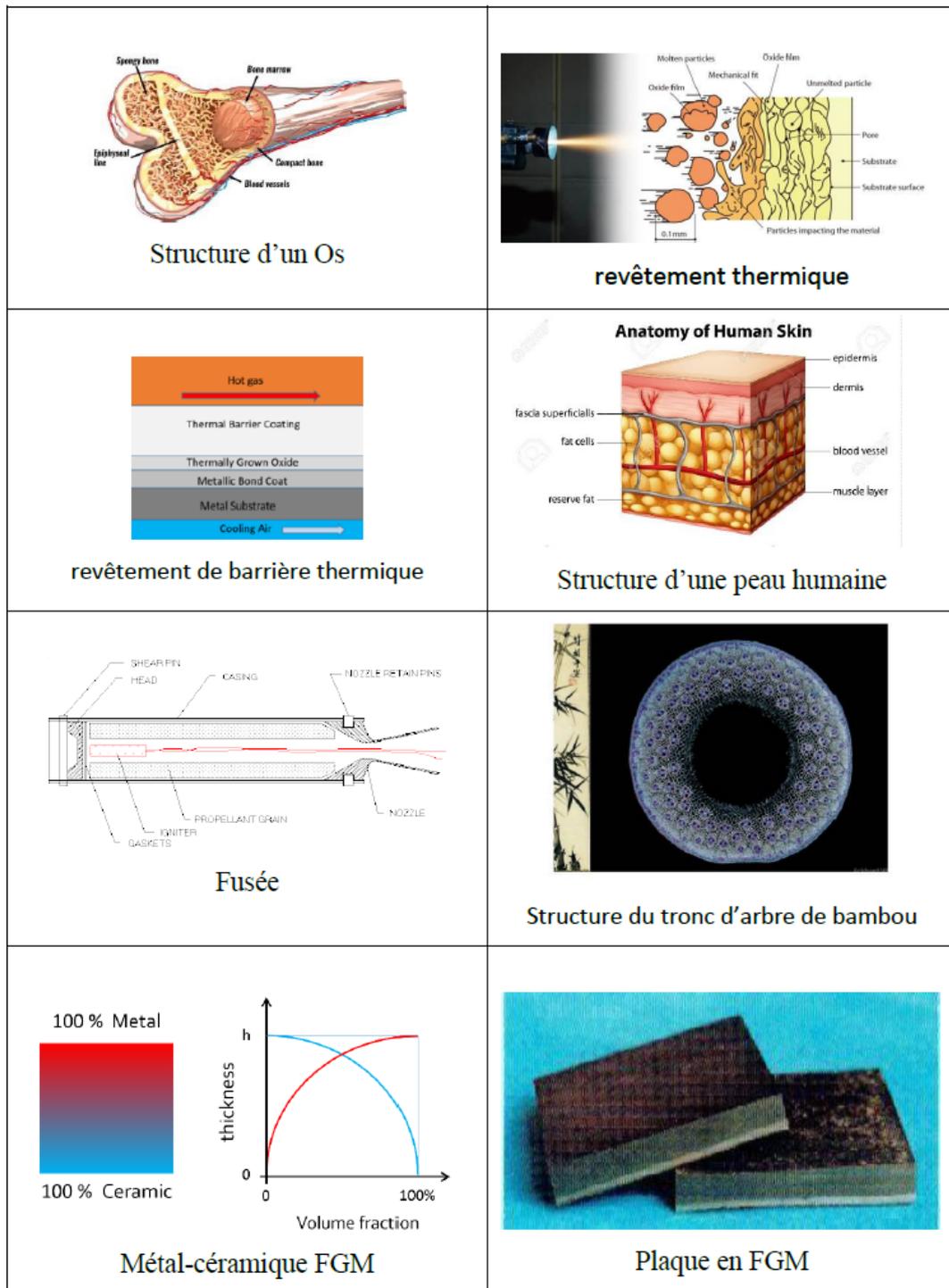
**Figure III.7 :** Exemples d'armatures en FRP de carbone actuellement disponibles pour le béton (11)

### III.7. Les matériaux à gradient de propriétés:

Actuellement, la meilleure manière pour combiner deux matériaux, en conservant leurs propriétés, consiste à les assembler d'un pourcentage variable sur la section transversale. Par exemple, l'ancrage d'une surface en céramique sur le dessus et d'une surface en acier sur le dessous avec une zone de transition lisse, appelée matériau à gradient de propriétés (FGM). Il est accepté comme un meilleur moyen de collage plutôt que de les déposer directement sans gradation. Par cette technique, les deux matériaux préservent leurs meilleures propriétés, comme la haute résistance, la rigidité élevée, la résistance à haute température, la faible densité de la céramique et la ténacité et la malléabilité de l'acier. Les FGM s'utilisent dans plusieurs industries et secteurs comme l'aérospatiale, le nucléaire, la défense, l'automobile, la communication, l'énergie, etc. En plus d'être produits artificiellement, les formes primitives des FGM existent dans la nature. L'os, la peau humaine, l'arbre de bambou peuvent être considérés comme des formes physiologiques d'FGM. La figure 1 illustre plusieurs exemples organiques et artificiels évoquant les FGM.

Les domaines d'application des FGM se résument comme suit :

- L'Aérospatial : Les boucliers thermiques pour engins spatiaux, les tubes échangeurs de chaleur.
- Le Biomédical : L'os artificiel, la peau et les dents.
- La Communication : Les fibres optiques, les lentilles et les semi-conducteurs.
- Le Domaine du nucléaire : Les palettes de combustible, la paroi de plasma des réacteurs de fusion.
- Le Secteur de l'énergie : Les générateurs thermoélectriques, les cellules solaires et les capteurs.
- L'Automobile : Les systèmes de transmission de puissance et les systèmes de freinage. (16)

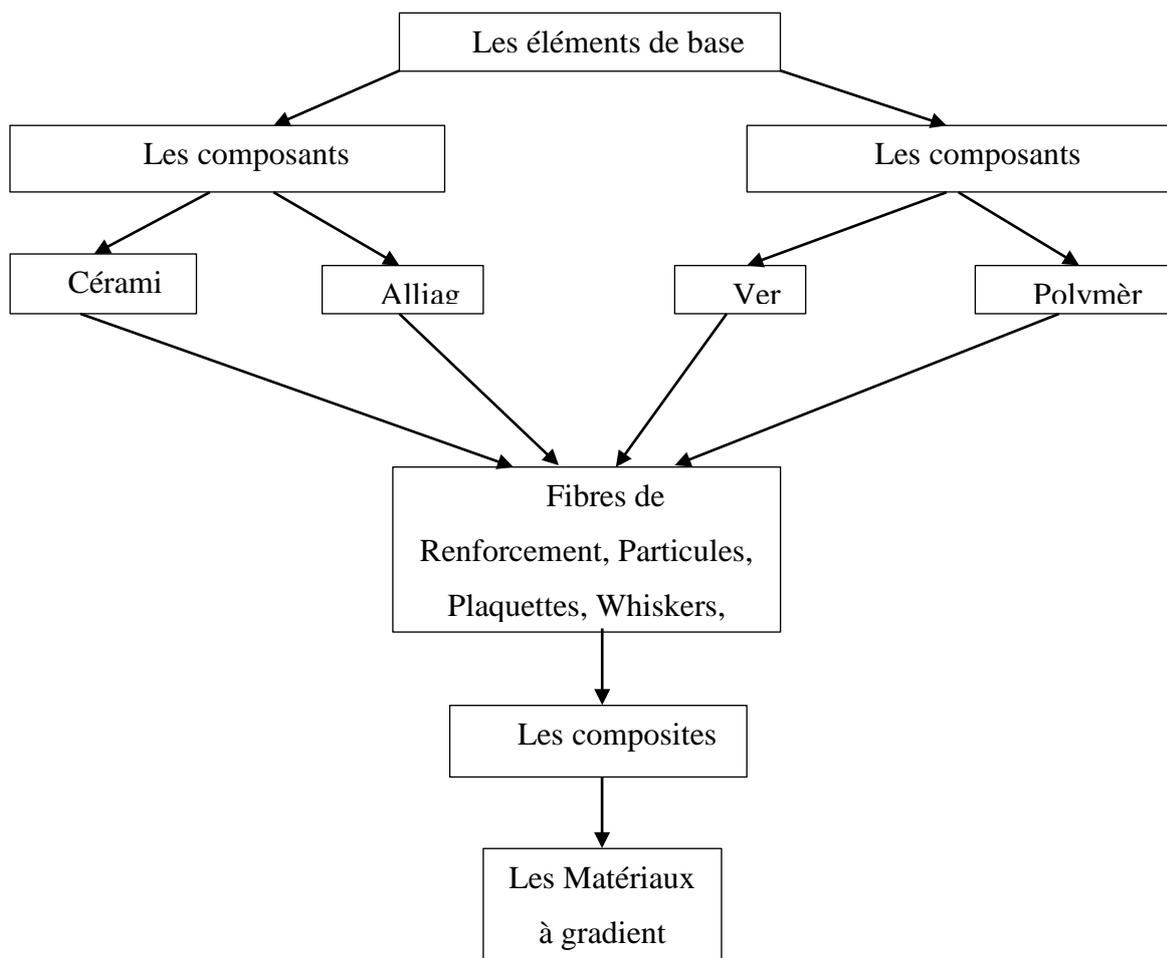


**Figure III.8.** Illustrations organiques et artificielles pour FGM (16)

### III.8. Histoire des matériaux fonctionnellement gradués (FGMs):

Dans le développement de notre société et de la culture, les matériaux ont joué un rôle essentiel. L'utilisation scientifique des matériaux de base disponibles en divers composés inorganiques et organiques a fait le chemin pour le développement des polymères avancés, les alliages, les céramiques d'ingénierie structurelles, etc. La structure de développement d'un

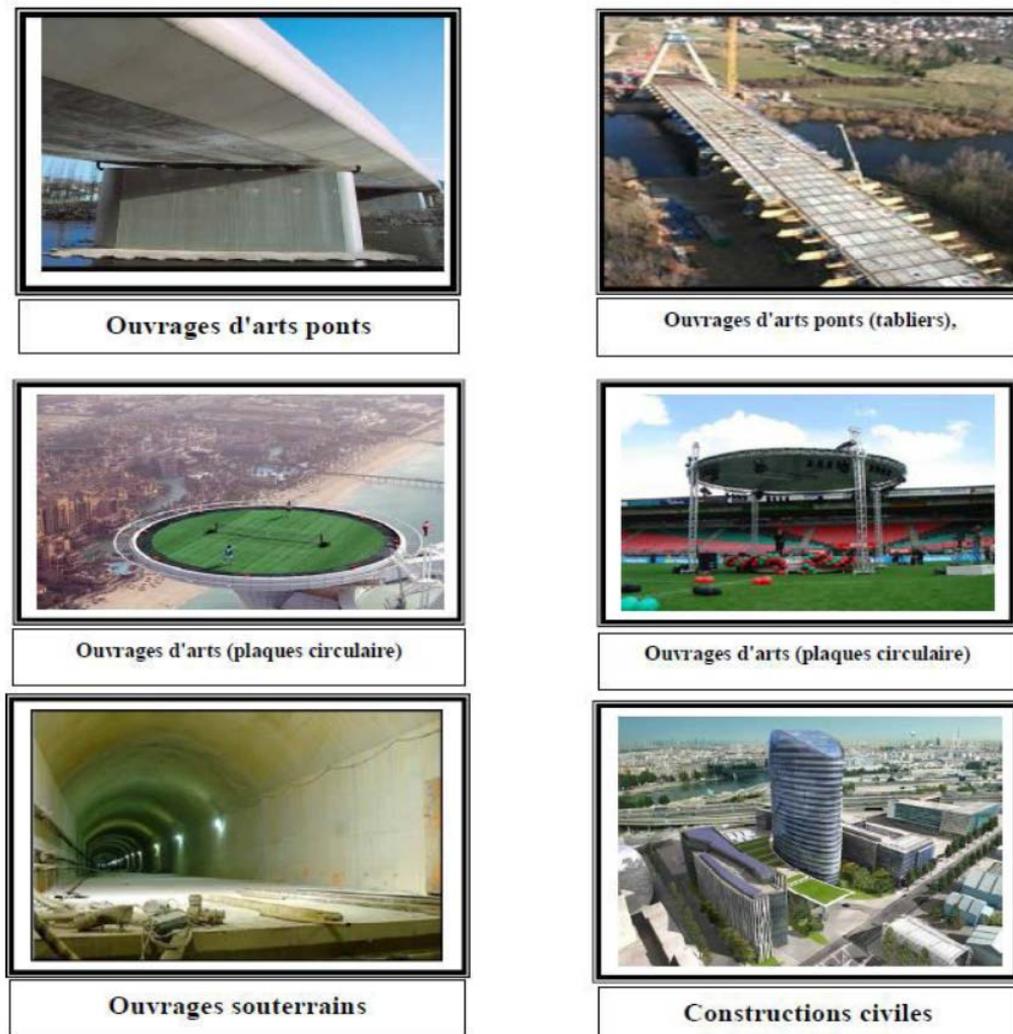
matériau moderne est illustrée sur la Fig. III.18. Les matériaux à gradient fonctionnel (FGMs) sont des matériaux de pointe dans la famille des composites d'ingénierie, constitués en deux ou plusieurs phases de composition continue et variable. Ces matériaux avancés avec des gradients de la composition, de la structure et/ou des propriétés spécifiques dans une direction préférée et/ou une orientation, sont caractéristiquement supérieurs aux matériaux homogènes constitués de différents composants similaires. Les propriétés mécaniques telles que le module d'élasticité de Young, coefficient de Poisson, le module d'élasticité de cisaillement, et la densité de la matière, varie en douceur et de façon continue dans des directions préférées dans les FGMs. Les FGMs ont été développés en combinant les matériaux d'ingénierie de pointe sous la forme de particules, de fibres, ou des plaquettes. Dans le processus continué d'améliorer la performance structurelle, les FGMs sont développés pour adapter l'architecture matérielle à l'échelle microscopique et pour optimiser certaines propriétés fonctionnelles des structures.



**Figure III.9.** Illustration de la hiérarchie des matériaux composites (17)

### III.9. Domaines d'applications des FGM:

Les caractéristiques importantes de la FGM les ont favorisées dans presque tous les domaines d'activité humaine. Des matériaux fonctionnellement calibrés sont actuellement utilisés dans un certain nombre d'industries, avec un potentiel énorme à utiliser dans d'autres applications à l'avenir. Les applications actuelles et l'application futuriste de la FGM sont présentées dans cette section. Les domaines d'application actuels comprennent les domaines d'application des matériaux fonctionnellement classés. Le domaine de l'utilisation de plaque est très répandue dans tous les domaines, en particulier dans le domaine du génie civil où, on les utilise dans les constructions simples (habitation) où les ouvrages d'art et elle existe sous formes différentes, y compris les circulaires et rectangulaires et d' autre formes selon la qualité de l' ouvrage, Comme celle-est représenté dans les photos ci-dessous. (14)



**Figure III-10 :**des exemples d'utilisation des FGM en génie civil (14)

### **III.10. Avantages et inconvénients des FGM :**

Les matériaux fonctionnellement gradués présentent des avantages et des inconvénients (14):

#### **III.10.1. Avantages de la 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.
- Elimination des singularités des contraintes à divers endroits, tels que les surfaces libres, des coins, des racines de fissures, etc. (14)

#### **III.10.2. Inconvénient de la FGM :**

Le principal 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, etc. Un exemple type est un mélange d'un métal avec la température de fusion ( $T_1$ ) et une céramique avec une température de fusion ( $T_2$ ).

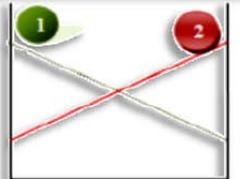
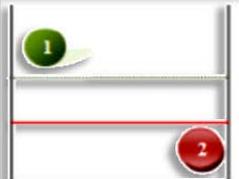
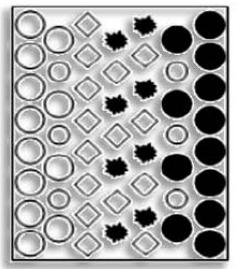
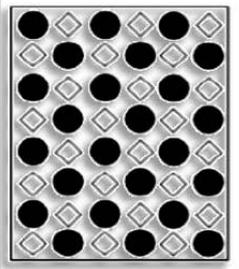
Dans la plupart des cas, un tel couple est habituellement ( $T_1 \ll T_2$ ). Puis, si la température de fabrication est d'environ ( $T_1$ ), la céramique est encore non fondue et la structure finale contient des particules de céramique non fondue dans une matrice métallique. Dans de nombreux cas, une 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 (carbures) dans une matrice solide peut être souhaitable. (14)

**III.11. Différences entre matériaux à gradient de propriétés et matériaux composites traditionnels:**

Les matériaux à gradient de propriétés sont donc des matériaux composites avec un caractère au microscope non homogène. Les changements continus de leur microstructure distinguent le FGM des matériaux composites conventionnels. Le changement continu de la composition a comme conséquence les gradients dans les propriétés de FGM.

Les différences dans la microstructure et les propriétés entre FGM et matériaux composites conventionnels sont illustrées schématiquement sur la figure I.4 ; Il en résulte un gradient qui déterminera les propriétés des FGM. Dans certains cas, on peut avoir un FGM constitué d'un même matériau mais de microstructure différente. (18)

<b>Propriétés</b>	<p>1 Résistance mécanique</p> <p>2 Conductivité thermique</p>		
<b>Structure</b>	<p><b>Éléments constitutifs:</b></p> <p>Céramique ○</p> <p>Métal ●</p> <p>Microporosité ◊</p> <p>Fibre ◐</p>		
<b>Matériaux</b>	<b>Exemple</b>	<b>FGM</b>	<b>NON-FGM</b>

**Figure III.11:** Caractéristiques des matériaux composites FGM en comparaison avec les matériaux composites conventionnels (18).

**III.12. Conclusion:**

Ce chapitre contient dans la première partie les types et les composants des matériaux composites. Ensuite, nous sommes passés à la définition des matériaux à gradient de propriétés dans la seconde partie. Nous avons présenté également les domaines d'application et les méthodes d'utilisation ainsi que de leurs caractéristiques positives et même négatives.

**Chapitre IV:**  
**Analyse des contraintes**  
**d'interface d'une poutre**  
**en béton armé renforcée**  
**par une plaque FGM**  
**poreuse**

## **Chapitre IV:**

### **Analyse des contraintes d'interface d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque FGM poreuse**

#### **IV. 1. Introduction:**

L'utilisation des plaques de renforcement en FRP pour le renforcement et la réparation des structures représente une alternative intéressante aux plaques en acier. Les matériaux FRP sont plus légers que l'acier. Ils présentent un rapport résistance / masse élevé. Ils sont résistants à la corrosion et sont généralement résistants aux attaques chimiques. Cette technique a été largement étudiée, et plusieurs exemples de structures existantes modernisées à l'aide de matériaux composites liés au CFRP peuvent être trouvés dans la littérature.

Parmi ces matériaux, les CFRP qui sont largement utilisés en raison de leurs caractéristiques. Le transfert des contraintes du béton vers la plaque de renforcement FRP est au cœur de l'effet de renforcement des structures en béton. En effet, les contraintes sont susceptibles de provoquer la défaillance prématurée et indésirable, telle que le décollement de la plaque de renforcement avec la poutre en béton.

Ce mode de rupture de décollement empêche la pleine utilisation de la résistance à la traction de la plaque collée. Il est donc important de comprendre le mécanisme de ce mode de défaillance de décollement et d'élaborer des règles de conception solides. Ce mode de rupture est le résultat des concentrations élevées des contraintes d'interface aux bords de la bande FRP collé.

La détermination des contraintes d'interface a été étudiée au cours de la dernière décennie pour les poutres renforcées par des tôle métalliques ou par des matériaux composites avancés. Plusieurs solutions analytiques ont été développées pour la détermination des contraintes d'interfaces. Toutes ces solutions sont pour des matériaux élastiques linéaires et utilisent la même hypothèse clé que l'adhésif est soumis à des contraintes normales et de cisaillement qui sont constante sur toute l'épaisseur de la couche d'adhésive.

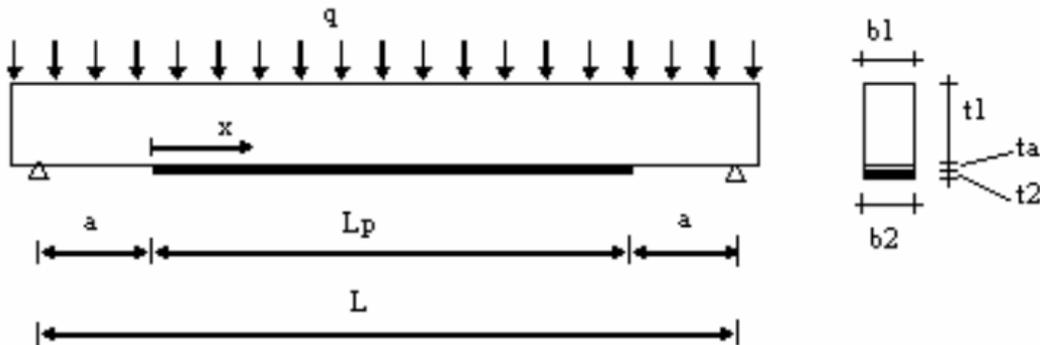
L'objectif principal de la présente étude est d'analyser les contraintes d'interface d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par collage externe des plaques FGM poreuse. Cette porosité peut se produire à l'intérieure d'un matériau FGM au cours de leur fabrication. Le chargement est considéré uniformément répartie. La loi de mélange de forme PFGM a été modifié afin de prendre en considération plusieurs type de distribution de porosité. Des

exemples numériques et une étude paramétrique sont présentés pour illustrer les principaux paramètres qui contrôlent les concentrations de contrainte au bord de la plaque de FGM.

#### IV. 2. Analyse théorique :

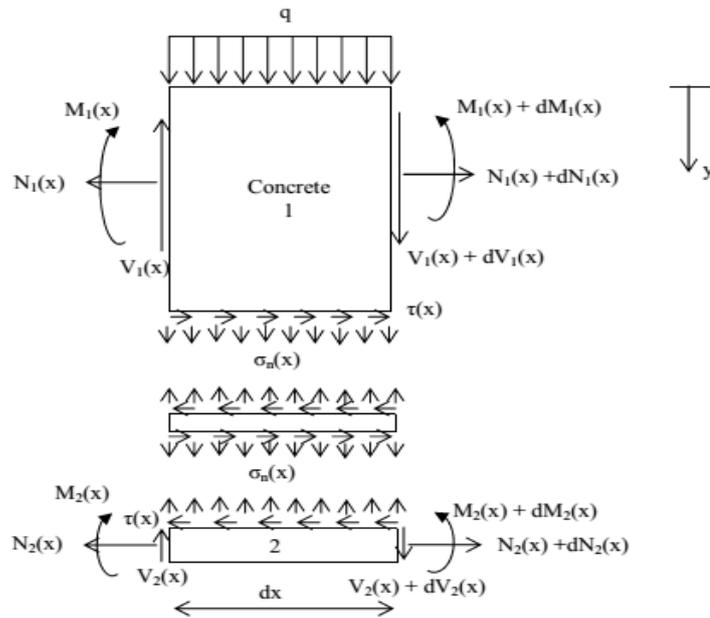
Dans la présente analyse, et en vue de la détermination des contraintes d'interface au niveau de la couche d'adhésive, le modèle théorique développé est basé sur les hypothèses suivantes :

- La poutre en béton armé, la couche d'adhésive et la plaque composite ont un comportement élastique linéaire.
- Les contraintes au niveau de la couche d'adhésive sont constantes à travers l'épaisseur de cette couche.
- La poutre BA est parfaitement collée avec la plaque composite.
- L'adhésif a pour rôle le transfert des contraintes de la poutre au composite.
- Les déformations de l'adhérent 1 et 2 sont dues aux moments de flexion et aux efforts normaux.



**Figure IV.1:** Poutre simplement appuyée renforcée par des plaques en matériaux composites

Un élément  $dx$  de la poutre renforcée (figure IV.1) est représenté dans la figure IV.2 montre d'une part, les contraintes de cisaillement et les contraintes normales d'interface ; d'autre part, elle indique la convention de signe utilisée pour le moment de flexion, l'effort tranchant, l'effort normal et le chargement appliqué. Dans la présente analyse, un comportement élastique linéaire est supposé pour les trois matériaux (poutre, l'adhésif et la plaque composite). La couche d'adhésive est supposée jouer un rôle de transfert des contraintes de la poutre à la plaque composite avec des contraintes constantes a travers toute son épaisseur.



**Figure IV.2:** Un segment différentiel de la poutre renforcée

Les propriétés du matériau sont supposées varier en fonction de la direction de l'épaisseur de la plaque de renforcement FGM, et la règle du mélange a été reformulée pour évaluer les caractéristiques des matériaux avec les phases et le taux de distribution de porosité:

**Tableau IV.01** La loi de mélange générale d'un matériaux FGM poreux et sans poreux:

Type 1: sans porosité	$E = (E_c - E_m) \left( \frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^k + E_m$
Type 2: 50-50	$E = (E_c - E_m) \left( \frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^k - (E_c + E_m) \left( \frac{\alpha}{2} \right) + E_m$
Type 3: 75-25	$E = (E_c - E_m) \left( \frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^k - E_c \left[ \frac{3}{4} \alpha \right] - E_m \left[ \frac{1}{4} \alpha \right] + E_m$
Type 4: 25-75	$E = (E_c - E_m) \left( \frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^k - E_c \left( \frac{1}{4} \alpha \right) - E_m \left( \frac{3}{4} \alpha \right) + E_m$
Type 5: 60-40	$E = (E_c - E_m) \left( \frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^k - E_c \left( \frac{3}{5} \alpha \right) - E_m \left( \frac{2}{5} \alpha \right) + E_m$
Type 6: 40-60	$E = (E_c - E_m) \left( \frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^k - E_c \left( \frac{2}{5} \alpha \right) - E_m \left( \frac{3}{5} \alpha \right) + E_m$

On note que le nombre réel positif  $k$  ( $0 \leq k < \infty$ ) est la loi de puissance ou indice de fraction volumique, et  $z$  est la distance du plan médian de la plaque FGM. La plaque FGM devient entièrement en céramique lorsque  $k$  est mis à zéro et entièrement métallique pour une grande

valeur de  $k$ .  $\alpha$  est la fraction volumique de porosité. Les propriétés matérielles d'une plaque FGM parfaite peuvent être obtenues lorsque  $\alpha$  est mis à zéro.  $E_c$  et  $E_m$  sont les modules de Young du céramique et du métal, respectivement.  $t_2$  c'est la hauteur de la plaque FGM.

#### IV . 2.1. Equations d'élasticité:

La déformation dans la poutre au voisinage de la couche d'adhésive peut être exprimé par :

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{eM_1(x)}{E_1I_1} - \frac{N_1(x)}{E_1A_1} \quad (IV.06)$$

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

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = -\frac{t_2}{2E_2b_2}M_2(x) + \frac{N_2(x)}{E_2b_2} \quad (IV.07)$$

Où  $u_1$  et  $u_2$  sont les déplacements horizontaux de la poutre et la plaque composite respectivement.  $M_1$  et  $M_2$  sont respectivement les moments de flexion appliqués à la poutre et la plaque composite ;  $E_1$  est le module de Young de la poutre poreuse;  $E_2$  est le module de Young du composite ;  $I_1$  est le moment d'inertie,  $e$  est la distance entre l'axe neutre à la fibre inférieure de la poutre,  $N_1$  et  $N_2$  sont les forces axiales appliquées à la poutre et à la plaque composite .

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

$$\text{Dans la direction } x : \frac{dN_1(x)}{dx} = \tau(x)b_2 \quad (IV.08)$$

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

$$\text{Dans la direction } y : \frac{dV_1(x)}{dx} = -[\sigma(x)b_2 + qb_1] \quad (IV.09)$$

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

$$\text{Le moment d'équilibre : } \frac{dM_1(x)}{dx} = V_1(x) - \tau(x)b_2e \quad (IV.10)$$

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

$$\text{Dans la direction } x : \frac{dN_1(x)}{dx} = \tau_n(x)b_2 \quad (IV.11)$$

$$\text{Dans la direction } y : \frac{dV_2(x)}{dx} = \sigma(x)b_2 \quad (IV.12)$$

$$\text{Le moment d'équilibre : } \frac{dM_2(x)}{dx} = V_2(x) - \tau(x)b_2\frac{t_2}{2} \quad (IV.13)$$

Où  $V_2$  est l'effort tranchant de la plaque de renforcement.

#### IV.2.2. La distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite-poutre:

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

$$\tau(x) = K_s \Delta u(x) = K_s [u_2(x) - u_1(x)] \quad (\text{IV.14})$$

Où,  $K_s$  est la rigidité au cisaillement de la couche d'adhésive par unité de longueur :

$$K_s = \frac{\tau(x)}{\Delta u(x)} = \frac{\tau(x)}{\Delta u(x)/t_a} \frac{1}{t_a} = \frac{G_a}{t_a} \quad (\text{IV.15})$$

est le déplacement relatif à l'interface de l'adhésif, et sont respectivement le module et l'épaisseur de la couche d'adhésive.

En différentiant les équations (IV.14), (IV.06) et (IV.07) par rapport à  $x$ , nous aurons :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \left[ \frac{N_2(x)}{E_2 b_2} - \frac{t_2}{2E_2 b_2} M_2(x) + \frac{N_1(x)}{E_1 A_1} - \frac{e M_1(x)}{E_1 I_1} \right] \quad (\text{IV.16})$$

$$M_1(x) = R M_2(x) \quad (\text{IV.17})$$

Avec:

$$R = \frac{E_1 I_1 D_{11}}{b_2} \quad (\text{IV.18})$$

Le moment total d'équilibre de l'élément différentiel de la figure IV.02 est donné par:

$$M_T(x) = M_1(x) + M_2(x) + N(x)(e + t_a + \frac{t_2}{2}) \quad (\text{IV.19})$$

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

$$N(x) = N_1(x) = N_2(x) = b_2 \int_0^x \tau(x) dx \quad (\text{IV.20})$$

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

$$M_1(x) = \frac{R}{R+1} \left[ M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x) (e + t_a + \frac{t_2}{2}) dx \right] \quad (\text{IV.21})$$

$$M_2(x) = \frac{1}{R+1} \left[ M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x) (e + t_a + \frac{t_2}{2}) dx \right] \quad (\text{IV.22})$$

La première dérivée des équations (IV.21) et (IV.22) :

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = \frac{R}{R+1} \left[ V_T(x) - b_2 \tau(x) (e + t_a + \frac{t_2}{2}) \right] \quad (\text{IV.23})$$

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = \frac{1}{R+1} \left[ V_T(x) - b_2 \tau(x) (e + t_a + \frac{t_2}{2}) \right] \quad (\text{IV.24})$$

En différentiant l'équation (IV.16) nous aurons:

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} = K_s \left( \frac{-t_2}{2b_2} E_2 \frac{dM_2(x)}{dx} + \frac{E_2}{b_2} \frac{dN_2(x)}{dx} - \frac{e}{E_1 I_1} \frac{dM_1(x)}{dx} + \frac{1}{E_1 A_1} \frac{dN_1(x)}{dx} \right) \quad (\text{IV.25})$$

La substitution de l'effort tranchant (équation (IV.24), (IV.23) et l'effort normal (équation (IV.20)) dans l'équation (IV.25) nous permet d'obtenir l'équation différentielle des contraintes d'interface de cisaillement :

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} = K_1 \left( E_2 + \frac{b_2}{E_1 A_1} + \frac{(e + \frac{t_2}{2})(e + t_a + \frac{t_2}{2})}{E_1 I_1 + b_2} b_2 E_2 \right) \tau(x) + K_1 \left( \frac{(e + \frac{t_2}{2})}{E_1 I_1 + b_2} E_2 \right) V_T(x) = 0 \quad (\text{IV.26})$$

La solution présentée ci dessus est limitée pour un chargement uniformément réparti pour le quel  $d^2V_T(x)/dx^2 = 0$  , et la solution générale de l'équation (IV.26) est donnée par :

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 q \left( \frac{L}{2} - x - a \right) \quad (\text{IV.27})$$

Où:

$$\lambda^2 = K_1 \left( E_2 + \frac{b_2}{E_1 A_1} + \frac{(e+\frac{t_2}{2})(e+t_a+\frac{t_2}{2})}{E_1 I_1 + b_2} b_2 E_2 \right) \quad (\text{IV.28})$$

Et:

$$m_1 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left( \frac{(e+\frac{t_2}{2})}{E_1 I_1 + b_2} E_2 \right) \quad (\text{IV.29})$$

Ou :

$$K_1 = \frac{1}{\frac{t_a}{G_a} + \frac{t_1}{3G_1} + \frac{t_2}{3G_2}} \quad (\text{IV.30})$$

$B_1$  et  $B_2$  sont des constantes d'intégration déterminées à partir des conditions aux limites. Dans la présente étude, une poutre simplement appuyée sollicitée par une charge uniformément répartie est analysée.

Pour la première condition :  $x = 0$

et

$$M_2(0) = 0 \quad \text{et} [N_1(0) = N_2(0)] = 0$$

$$M_1(0) = M_T(0) = \frac{qa}{2} (L - a) \quad (\text{IV.31})$$

$$\frac{d\tau(x=0)}{dx} = m_2 M_T(0) m_2 = \frac{eK_s}{E_1 I_1} \quad (\text{IV.32})$$

par substitution de l'équation (IV.21) dans (IV.26),  $B_2$  sera égal à :

$$B_2 = \frac{qam_2}{2\lambda} (L - a) + \frac{m_1}{\lambda} q \quad (\text{IV.33})$$

A partir de la deuxième condition, on peut déterminer l'expression de  $B_1$  :

$$B_1 = \frac{qam_2}{2\lambda} (L - a) \tanh\left(\frac{\lambda L_p}{2}\right) - \frac{qm_1}{\lambda} \tanh\left(\frac{\lambda L_p}{2}\right) \quad (\text{IV.34})$$

$$\text{Pour } \left(\frac{\lambda L_p}{2}\right) > 10 \text{ on a } \tanh\left(\frac{\lambda L_p}{2}\right) \approx 1 \text{ .}$$

Donc l'expression de sera donnée par la formule simplifiée suivante:

$$B_1 = \frac{qam_2}{2\lambda} (L - a) - \frac{qm_1}{\lambda} = -B_2 \quad (\text{IV.35})$$

La contrainte d'interface de cisaillement pour ce cas de chargement s'écrit donc sous la forme suivante :

$$\tau(x) = \left[ \frac{am_2}{2} (L - a) - m_1 \right] \frac{qe^{-\lambda x}}{\lambda} + m_1 q \left( \frac{L}{2} - x - a \right) \quad 0 \leq x \leq L_p \quad (\text{IV.36})$$

Où  $q$  est la charge uniformément répartie

### IV.2.3. La distribution des contraintes normales dans l'interface composite-poutre:

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

$$\sigma_n(x) = K_n \Delta w(x) = K_n [w_2(x) - w_1(x)] \quad (\text{IV.37})$$

est la rigidité normale de la couche d'adhésive par unité de longueur qui est donnée par :

$$K_n = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)} = \frac{\sigma_n(x)}{\Delta w(x)/t_a} \left( \frac{1}{t_a} \right) = \frac{E_a}{t_a} \quad (\text{IV.38})$$

et sont respectivement les déplacements verticaux des adhérents 1 et 2.

En différentiant l'équation (IV.38) deux fois, nous aurons :

$$\frac{d^2 \sigma(x)}{dx^2} = K_n \left[ \frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} - \frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} \right] \quad (\text{IV.39})$$

En écrivant l'équation de la ligne élastique pour la poutre et pour la plaque de renforcement, nous aurons:

$$\frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} = \frac{M_1(x)}{E_1 I_1}, \quad \frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} = -\frac{E_2 M_2(x)}{b_2} \quad (\text{IV.40})$$

En se basant sur les équations d'équilibre (IV.09) à (IV.14), les équations différentielles d'équilibre des adhérents 1 et 2 exprimées en fonction des contraintes de cisaillement et des contraintes normales sont données comme suit :

$$\text{Adhérent 1 : } \frac{d^4 w_1(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_1 I_1} b_2 \sigma_n(x) + \frac{e}{E_1 I_1} b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_1 I_1} \quad (\text{IV.41})$$

$$\text{Adhérent 2: } \frac{d^4 w_2(x)}{dx^4} = -E_2 \sigma_n(x) + E_2 \frac{t_2}{2} + \frac{d\tau}{dx} \quad (\text{IV.42})$$

En substituant les équations (IV.41) et (IV.42) dans la quatrième dérivée des contraintes normales d'interface obtenues à partir de l'équation (IV.37), nous aurons l'équation différentielle des contraintes normales d'interface :

$$\frac{d^4 \sigma(x)}{dx^4} + K_n \left( E_2 + \frac{b_2}{E_1 I_1} \right) \sigma_n(x) - K_n \left( E_2 \frac{t_2}{2} - \frac{e b_2}{E_1 I_1} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q K_n}{E_1 I_1} = 0 \quad (\text{IV.43})$$

La solution générale de cette équation est donnée par [Theillout. 1997]:

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{IV.44})$$

Pour des grandes valeurs de « x », il est supposé que les contraintes normales deviennent nulles, et par conséquent  $C_3 = C_4 = 0$  d'où la solution générale prendra la forme suivante :

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

$$\text{Où: } \beta = \sqrt[4]{\frac{K_n}{E_1 I_1} \left( \frac{b_2}{E_1 I_1} + D_{11} \right)} \quad (\text{IV.46})$$

$$n_1 = \left( \frac{e b_2 - E_2 E_1 I_1 \frac{t_2}{2}}{E_2 E_1 I_1 + b_2} \right) \quad (\text{IV.47})$$

$$\text{et: } n_2 = \frac{1}{E_2 E_1 I_1 + b_2} \quad (\text{IV.48})$$

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

$$C_1 = \frac{K_n}{2\beta^3 E_1 I_1} \left[ V_T(0) + \beta M_T(0) - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left( \frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \right] \quad (\text{IV.49})$$

$$C_2 = -\frac{K_n}{2\beta^2 E_1 I_1} M_T(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad (\text{IV.50})$$

### IV.3. Résultats et discussion:

L'analyse des contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par plaque FGM poreuse est présenté dans cette partie. Différents taux de distribution de porosité est pris en considération dans cette étude. La poutre est soumis à un chargement uniformément réparti.

Les propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans la présente analyse sont portées dans le tableau IV.1.

Le tableau IV.2 présente une étude comparative des contraintes d'interfaces d'une poutre en béton renforcée en flexion par une plaque FGM (k=5 et 10) avec une solution analytique existante (Tounsi et al. 2005) d'une poutre en béton renforcée par une plaque composite classique (CFRP et GFRP). Le chargement est considéré uniformément répartie. Les résultats des contraintes d'interfaces d'une poutre en béton renforcée par une plaque renforcée par une plaque CFRP sont plus importante que celle de la présente solution, tandis que la poutre renforcée par une plaque GFRP sont plus petits que la prédiction actuelle.

L'effet de la variation du taux de distribution de porosité sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse avec plusieurs fraction volumique de porosité et différentes combinaisons est montré dans les tableaux IV.3 et IV.4, respectivement. L'indice de puissance est pris égal à k=5 et 10. Les contraintes d'interface devient plus faible avec l'augmentation de la fraction volumique de porosité. Ces contraintes deviennent plus grandes quand la poutre en béton est renforcée par une plaque FGM en Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Le tableau IV.06 présente l'effet de l'épaisseur de la plaque de renforcement sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse. Cinq type de distribution de porosité est pris en considération. Les résultats révèlent que l'épaisseur de la plaque FGM augmente de manière significative les contraintes de décollement et de

cisaillement. Ainsi, toute augmentation de la rigidité de la plaque de renforcement entraîne une augmentation des contraintes d'interface.

Dans les tableaux IV.08 et IV.09, l'effet du module d'Young du béton et du l'adhésif sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse. La fraction volumique de porosité est pris égal  $\alpha=0.2$ . A partir de ces résultats, on peut conclure que le module d'Young de la poutre en béton et de l'adhésif influence considérablement la contrainte de cisaillement et la contrainte normale.

L'influence de la région non renforcée sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée en flexion par une plaque FGM poreuse est présenté dans le tableau IV.09. La longueur de la distance non renforcée est pris égal à ( $a=50\text{mm}$ ,  $100\text{mm}$  et  $200\text{mm}$ ). On peut constater que la contrainte d'interface augmente avec l'augmentation de la longueur de la région non renforcée.

Le tableau IV.10 montre l'effet de la géométrie de la poutre (rapport  $t_1/b_1$ ) sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse. La poutre est considérée de forme carrée et rectangulaire. On peut conclure que les contraintes d'interface deviennent plus faible quand le rapport  $t_1/b_1$  augmente (poutre de forme rectangulaire). On peut également noter que les contraintes d'interface deviennent plus importantes pour distribution des pores de type V.

**Tableau IV.02 : Propriétés mécaniques des matériaux utilisés**

Matériaux	$E$ (GPa)	$G$ (GPa)	Largueur (mm)	Hauteur (Epaisseur) (mm)
Béton	30	/	$b_1=200$	$t_1=300$
Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	380	/	$b_2=200$	$t_2=4$
Zirconia ( $\text{ZrO}_2$ )	151	/	$b_2=200$	$t_2=4$
Titane (Ti-6Al-4V)	105.7	/	$b_2=200$	$t_2=4$
Aluminum oxide (Alum-oxide)	320.2	/	$b_2=200$	$t_2=4$
Aluminium (Al)	70	/	$b_2=200$	$t_2=4$
Adhésif	3	/	$b_a=200$	$t_a=2$

**Tableau IV.03:** Comparaison des contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque composite et FGM.

Contraintes d'interface	Tounsi (2005)		Présente méthode	
	GFRP	CFRP	FGM	FGM
			k=5 et a=0.1	k=5 et a=0.2
$\tau(x)$ (MPA)	1.0885	1.791	1.4897	1.4858
$\sigma_n(x)$ (MPA)	0.826	1.078	0.98022	0.97872

**Tableau IV.04:** Effet du taux de distribution de porosité sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse

	Type de distribution de porosité	a=0.1		a=0.15		a=0.2	
		$\tau(x)$	$\sigma_n(x)$	$\tau(x)$	$\sigma_n(x)$	$\tau(x)$	$\sigma_n(x)$
		(MPA)	(MPA)	(MPA)	(MPA)	(MPA)	(MPA)
k= 5	Type II	1.4897	0.98022	1.4707	0.97352	1.4858	0.97872
	Type III	1.0795	0.82364	0.89588	0.74255	0.66365	0.62694
	Type IV	1.5144	0.98863	1.4909	0.98062	1.4749	0.97523
	Type V	1.4988	0.98342	1.4754	0.97522	1.4721	0.97412
	Type VI	1.4820	0.97742	1.4717	0.97392	1.5178	0.98993
k=10	Type II	1.1076	0.83533	1.0058	0.79191	0.92774	0.75717
	Type III	0.96977	0.77612	0.75985	0.67691	0.46866	0.51420
	Type IV	1.1450	0.85082	1.0655	0.81780	0.97896	0.78006
	Type V	1.1363	0.84707	1.0469	0.80974	0.96504	0.77389
	Type VI	1.0790	0.82332	0.96808	0.77532	0.92133	0.75409

**Tableau IV.05:** Effet du taux de distribution de porosité ainsi que le type de la plaque de renforcement sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse ( $\alpha=0.2$ ).

		Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Al/ZrO <sub>2</sub>		Ti-6Al-4V/Aluminumoxide	
		$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)	$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)	$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)
k= 5	Type II	1.4858	0.97872	1.1197	0.84036	1.4081	0.95138
	Type III	1.6158	1.0227	1.0786	0.82311	1.3413	0.92696
	Type IV	1.4749	0.97523	1.1597	0.85668	1.4768	0.97553
	Type V	1.4721	0.97412	1.1359	0.84712	1.4356	0.96122
	Type VI	1.5178	0.98993	1.1034	0.83361	1.3809	0.94140
k= 10	Type II	0.92774	0.75717	1.0632	0.81665	1.2328	0.88567
	Type III	1.0628	0.81654	1.0185	0.79751	1.1287	0.84391
	Type IV	1.0433	0.80829	1.1091	0.83592	1.3288	0.92230
	Type V	0.96504	0.77389	1.0828	0.82493	1.2721	0.90089
	Type VI	0.92133	0.75409	1.0465	0.80953	1.1921	0.86958

**Tableau IV.06:** Effet du taux de distribution de porosité ainsi que l'épaisseur de la plaque de renforcement sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse ( $\alpha=0.2$ ).

		t <sub>2</sub> =4		t <sub>2</sub> =6		t <sub>2</sub> =8	
		$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)	$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)	$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)
k= 5	Type II	1.4858	0.97872	1.7880	1.3178	2.0199	1.6174
	Type III	1.6158	1.0227	1.9345	1.3713	2.1752	1.6766
	Type IV	1.4749	0.97523	1.7755	1.3128	2.0066	1.6123
	Type V	1.4721	0.97412	1.7722	1.3117	2.0032	1.6108
	Type VI	1.5178	0.98993	1.8244	1.3314	2.0588	1.6329

k= 10	Type II	0.76575	0.67975	0.93804	0.92645	1.0800	1.1533
	Type III	0.46866	0.51420	1.2955	1.1102	1.4826	1.3763
	Type IV	1.0433	0.80829	1.2722	1.0990	1.4568	1.3634
	Type V	0.96504	0.77389	1.1786	1.0537	1.3521	1.3086
	Type VI	0.92133	0.75409	1.1262	1.0271	1.2931	1.2765

**Tableau IV.07:** Effet du taux de distribution de porosité ainsi que le module d' Young du béton sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse ( $\alpha=0.2$ ).

		E1=35000		E1=40000		E1=45000	
		$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)	$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)	$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)
k= 5	Type II	1.3581	0.88993	1.2532	0.81763	1.1650	0.75728
	Type III	1.4793	0.93140	1.3665	0.85668	1.2717	0.79429
	Type IV	1.3480	0.88662	1.2436	0.81440	1.1562	0.75432
	Type V	1.3454	0.88560	1.2412	0.81344	1.1539	0.75341
	Type VI	1.3878	0.90045	1.2810	0.82754	1.1912	0.76665
k= 10	Type II	0.84399	0.68492	0.77599	0.62672	0.71953	0.57870
	Type III	0.96769	0.73931	0.89031	0.67704	0.82589	0.62550
	Type IV	0.94975	0.73174	0.87371	0.67005	0.81046	0.61899
	Type V	0.87809	0.70020	0.80751	0.64088	0.74884	0.59181
	Type VI	0.83808	0.68212	0.77059	0.62413	0.71450	0.57628

**Tableau IV.08:** Effet du taux de distribution de porosité ainsi le module d' Young de l'adhésif sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse ( $\alpha=0.2$ ).

		Ea=3000		Ea=4000		Ea=5000	
		$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)	$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)	$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)
k= 5	Type II	1.4858	0.97872	1.5161	1.0779	1.5353	1.1583
	Type III	1.6158	1.0227	1.6485	1.1260	1.6691	1.2100
	Type IV	1.4749	0.97523	1.5050	1.0737	1.5240	1.1540
	Type V	1.4721	0.97412	1.5022	1.0727	1.5212	1.1526
	Type VI	0.81402	0.70366	1.5488	1.0900	1.5683	1.1713
k= 10	Type II	0.92774	0.75717	0.94757	0.83470	0.96002	0.89738
	Type III	1.0628	0.81654	1.0853	0.89984	1.0994	0.96747
	Type IV	1.0433	0.80829	1.0654	0.89073	1.0793	0.95777
	Type V	0.96504	0.77389	0.98559	0.85298	0.99853	0.91715
	Type VI	0.66211	0.62620	0.94100	0.83136	0.95343	0.89400

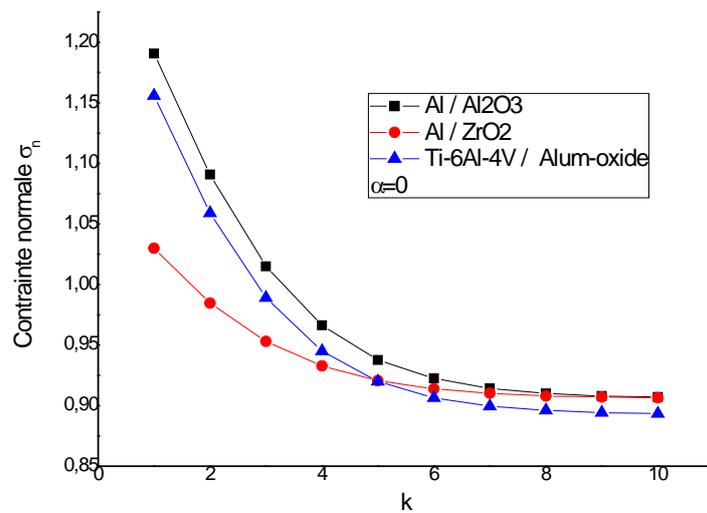
**Tableau 09:** Effet du taux de distribution de porosité ainsi que la longueur de la région non renforcée sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse ( $\alpha=0.2$ )

		a=50		a=100		a=200	
		$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)	$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)	$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)
k= 5	Type II	0.48478	0.32054	0.70078	0.46257	1.1090	0.73101
	Type III	0.54184	0.34369	0.77363	0.49022	1.2118	0.76722
	Type IV	0.48011	0.31872	0.69475	0.46036	1.1005	0.72819
	Type V	0.47891	0.31818	0.69319	0.45971	1.0983	0.72728
	Type VI	0.49870	0.32639	0.71863	0.71863	1.1344	0.74038

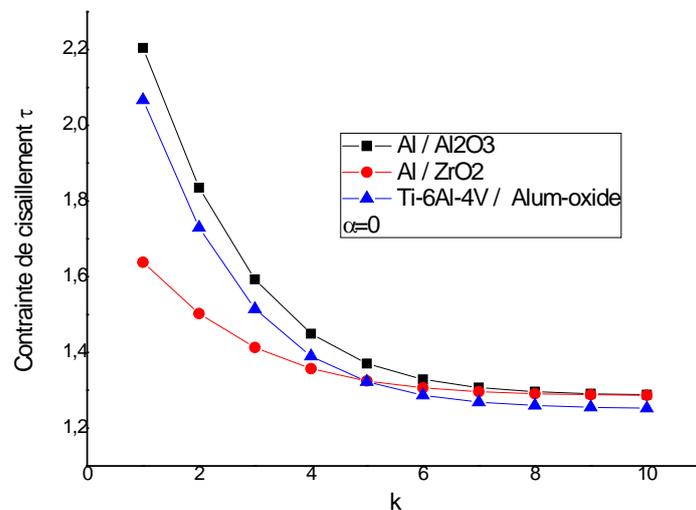
k= 10	Type II	0.26204	0.21612	0.40552	0.33274	0.67700	0.55339
	Type III	0.31238	0.24213	0.47416	0.36596	0.78022	0.60018
	Type IV	0.30495	0.23842	0.46412	0.36129	0.76522	0.59366
	Type V	0.27570	0.22332	0.42428	0.34200	0.62357	0.52780
	Type VI	0.25972	0.21486	0.40231	0.33108	0.67208	0.55102

**Tableau 10:** Effet du taux de distribution de porosité ainsi que le rapport  $t_1/b_1$  sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse ( $\alpha=0.2$ )

		t1/b1=1		t1/b1=1.5		t1/b1=2	
		$\tau(x)$ (MPa)	$\sigma_n(x)$ (MPa)	$\tau(x)$ (MPa)	$\sigma_n(x)$ (MPa)	$\tau(x)$ (MPa)	$\sigma_n(x)$ (MPa)
k= 5	Type II	3.6713	2.4287	1.4858	0.97872	0.77192	0.50785
	Type III	3.9621	2.5210	1.6158	1.0227	0.84332	0.53278
	Type IV	3.6466	2.4210	1.4749	0.97523	0.76596	0.50587
	Type V	3.6403	2.4187	1.4721	0.97412	0.76438	0.50523
	Type VI	3.7433	2.4520	1.5178	0.98993	0.78937	0.51415
k= 10	Type II	2.3600	1.9246	0.92774	0.75717	0.47367	0.38722
	Type III	2.6864	2.0648	1.0628	0.81654	0.54469	0.41878
	Type IV	2.6395	2.0455	1.0433	0.80829	0.53441	0.41439
	Type V	2.4508	1.9644	0.96504	0.77389	0.49322	0.39606
	Type VI	2.3443	1.9172	0.92133	0.75409	0.47028	0.38557



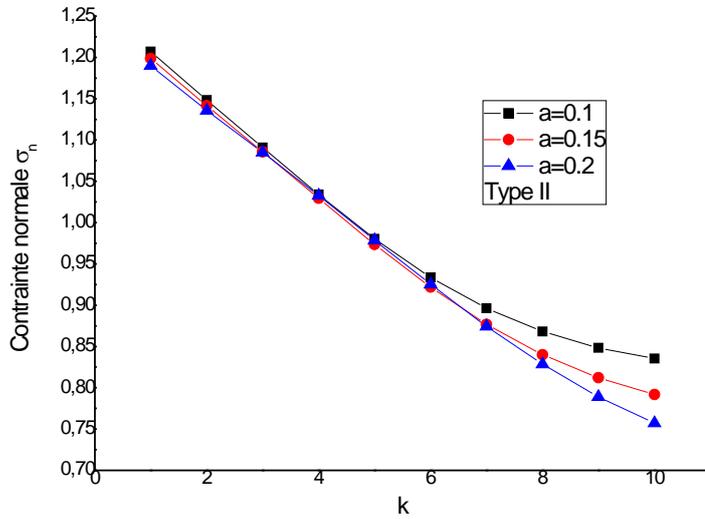
**Figure IV. 03:**Variation de la contrainte normale en fonction de l'indice de puissance d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM,  $\alpha=0$



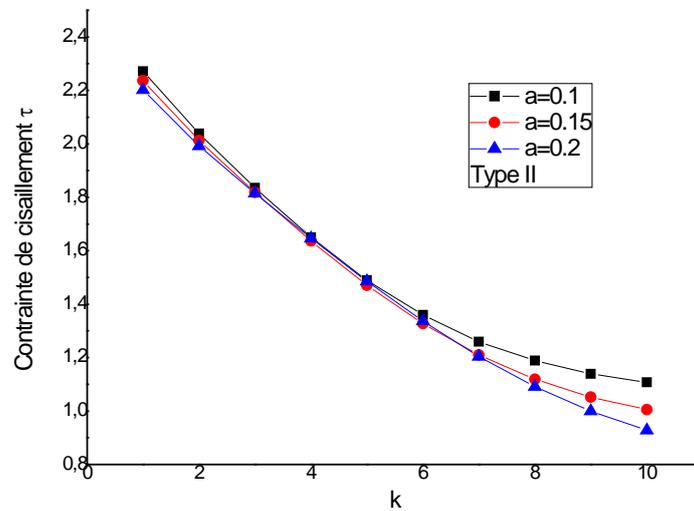
**Figure IV. 04:**Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de l'indice de puissance d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM,  $\alpha=0$

Les figures IV.03 et IV.04 présentent respectivement, la variation des contraintes normales et des contraintes de cisaillement en fonction de l'indice de puissance d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM composée de trois types de combinaison, A partir de ces

figures, on peut remarquer que les contraintes d'interface deviennent plus importantes quand la poutre est renforcée par une plaque FGM de type Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



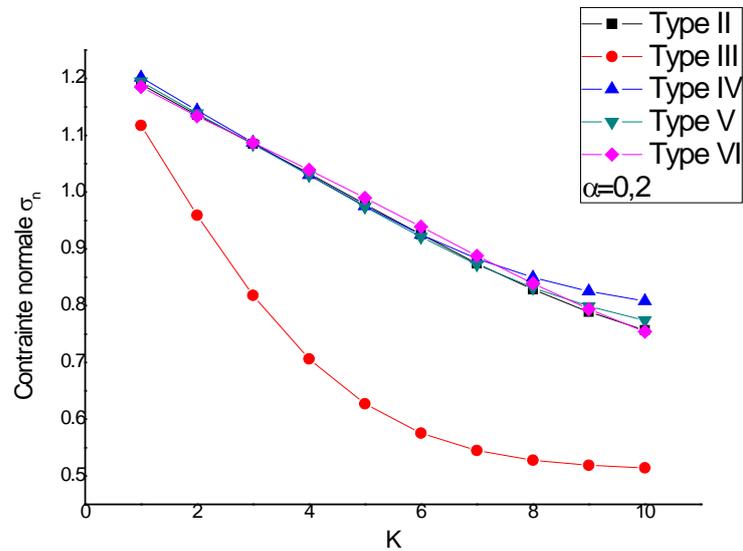
**Figure IV. 05:** Effet de porosité sur la contrainte normale en fonction de l'indice de puissance d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM, (Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)



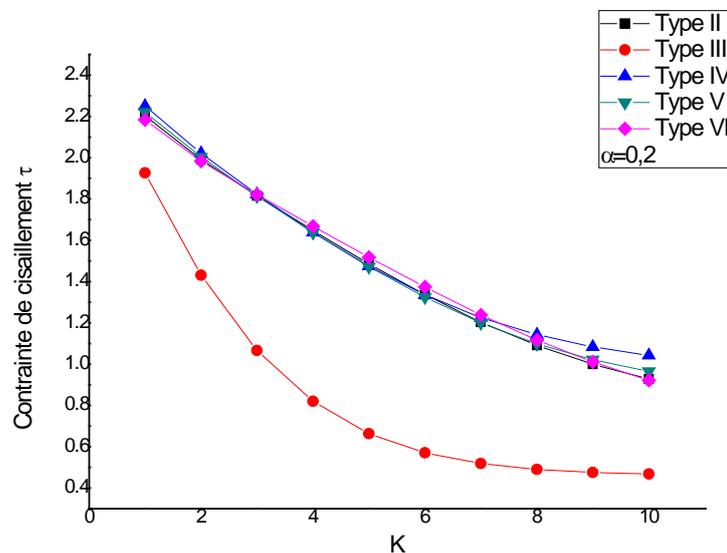
**Figure IV. 06:** Effet de porosité sur la contrainte de cisaillement en fonction de l'indice de puissance d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM, (Al/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

L'influence de la fraction volumique de porosité sur les contraintes normales et de cisaillement d'une poutre en béton renforcée en flexion par une plaque FGM poreuse en fonction de l'indice de puissance est montrée dans les figures IV.05 et IV06, respectivement.

On peut noter que l'existence des pores réduit les contraintes d'interfaces ce qui permet de limiter le risque de décollement de la plaque de renforcement.



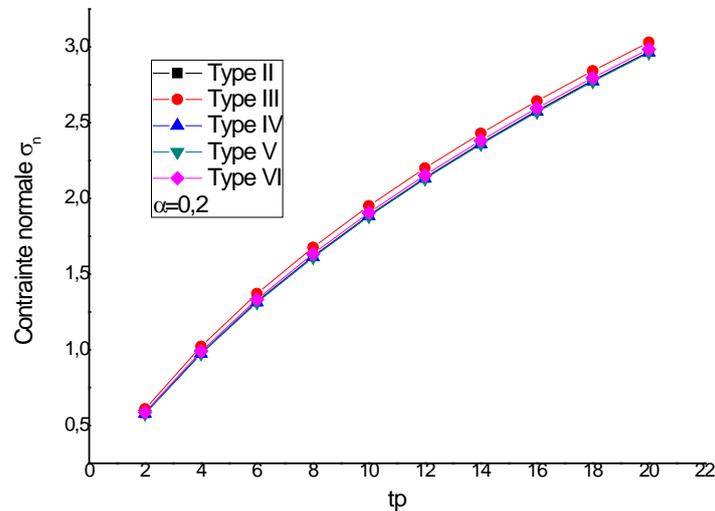
**Figure IV. 07:**Effet du taux de distribution de porosité sur la contrainte normale en fonction de l'indice de puissance d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM,(Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ,  $\alpha=0.2$



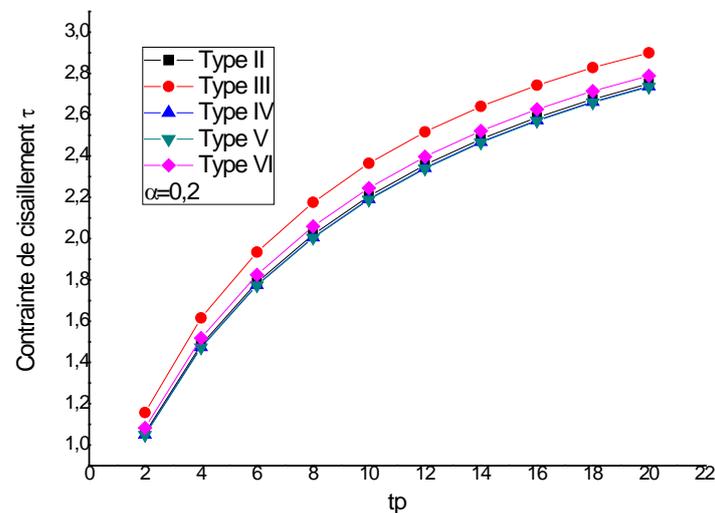
**Figure IV. 08:** Effet du taux de distribution de porosité sur la contrainte de cisaillement en fonction de l'indice de puissance d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM,(Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), $\alpha=0.2$

Les figures IV.07 et IV.08 montrent l'effet de la variation du taux de distribution de porosité sur les contraintes normales et de cisaillement d'une poutre en béton renforcée par

une plaque FGM poreuse en fonction de l'indice de puissance. La fraction volumique de porosité est pris égale à  $\alpha=0.2$ . On peut constater que la variation du taux de distribution de porosité à un effet remarquable sur les contraintes d'interface.



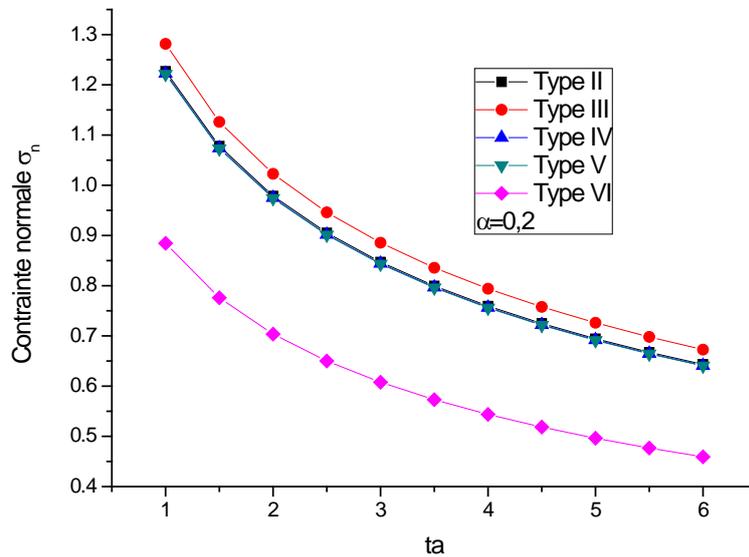
**Figure IV.09:** Variation de la contrainte normale en fonction de l'épaisseur de la plaque d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM,(Al/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), $\alpha=0.2$



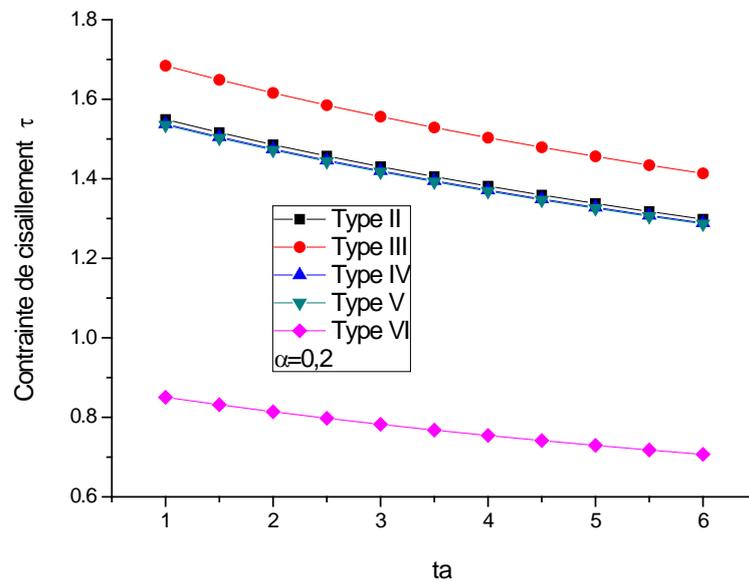
**Figure IV.10:** Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de l'épaisseur de la plaque d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM,(Al/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), $\alpha=0.2$

Les figures IV.09 et IV.10 présentent l'effet du taux de distribution de porosité sur les contraintes normales et de cisaillement en fonction du l'épaisseur de la plaque de

renforcement d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse. Les contraintes d'interface augmente avec l'augmentation du l'épaisseur de la plaque FGM.



**Figure IV.11:** Variation de la contrainte normale en fonction de l'épaisseur de l'adhésif d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM,(Al/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), $\alpha=0.2$



**Figure IV. 12:** Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de l'épaisseur de l'adhésif d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM,(Al/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), $\alpha=0.2$

L'effet du taux de distribution de porosité sur les contraintes normales et de cisaillement est également montré en fonction de l'épaisseur de l'adhésif dans les figures IV.11 et IV.12, respectivement. On peut constater que les contraintes d'interface devient plus faible à mesure que l'épaisseur de l'adhésif augmente.

#### **IV.4. Conclusion:**

Une analyse théorique des contraintes d'interface a été présentée pour des poutres en béton simplement appuyées renforcées avec une mince plaque en FGM et soumises à une charge de flexion uniformément répartie. Les principales caractéristiques de la présente analyse comprennent la prise en compte de différents taux de distribution de porosité entre les composants de la plaque FGM (céramique/métal).

Dans la dernière partie de ce chapitre, des études paramétriques approfondies ont été réalisées pour les poutres renforcées avec différents ratios de paramètres de conception. Des observations ont été faites sur la base des résultats numériques et graphique concernant la surestimation des contraintes d'interfaces par les solutions classiques qui négligent l'effet du taux de distribution de porosité.

# **Conclusion générale**

## Conclusions générales

Le concept de matériau FGM a été proposé pour augmenter l'adhérence et minimiser les contraintes thermiques. Depuis lors, les efforts visant à développer des matériaux hautement résistants utilisant les FGM se sont poursuivis. Les FGM ont des propriétés qui peuvent varier dans plusieurs directions appropriées. Les propriétés mécaniques de ces matériaux sont souvent représentées sous forme de séries et de variations d'indice de loi de puissance. Dans ces matériaux gradués, il existe une variation régulière et continue des propriétés des matériaux sur toute l'épaisseur. Cela n'entraîne aucune concentration de stress et une meilleure résistance à la fatigue.

Lors de la fabrication des plaques FGM, des défauts tels que des porosités peuvent apparaître. Ceux-ci peuvent changer le comportement de ces plaques. Dans ce travail, nous avons étudié l'évolution des contraintes de cisaillement et des contraintes normales à l'interface des structures de type poutres en béton armé renforcées en flexion par des plaques FGM poreuse. Plusieurs équations de la loi de mélange ont été utilisées afin de prédire les caractéristiques mécaniques des plaques de renforcement en FGM avec plusieurs types de distribution de porosité entre les particules du céramique et du métal.

Les résultats obtenus ont indiqué les avantages d'utiliser un taux de distribution de porosité différent par rapport à une plaque traditionnelle sans porosité ou à porosité uniforme, pour le même coefficient de porosité, les contraintes d'interface prennent des valeurs différentes lorsque le taux de distribution de porosité est modifié.

# **Références bibliographiques**

### Références bibliographiques

1. **ITMAIZEH, Ehab.** *PATHOLOGIE DE STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ [Mémoire de Master Académique]*. 2015/2016.
2. **Ait, Atmane.** *Pathologie carbonatation-carde*. Janv./Fev. 2006.
3. **Hermann, Miyamoto.** *Pathologie alcali-reaction-carde*. Nov./dec. 2005.
4. **CHABBI Radhia FERHOUNE Noureddine BOUABDALLAH Fouzia.** *Pathologies, diagnostic à l'aide de CND et techniques de réparation et protection des ouvrages en béton armé : état de l'art*.
5. **AIT AMAR MEZIANE, Mohamed.** *cour pathologie*. 2019/2020.
6. **al, Akavci et.** *LES FACTEURS D'INFLUENCE SUR LA DÉGRADATION DES OUVRAGES*. N°06, Juin 2005.
7. **Krishna, Vamsi.** *Concevoir, construire et gérer des structures durables en béton*. 28 novembre 2013. p. 1.
8. **BADOUR, Slimane.** *Utilisation des matériaux composites pour la réparation parasismique des voiles en béton armé [memoire de fin d'étude]*. TIARET : s.n., 2017 /2018.
9. **TOUIL, Brahim.** *ETUDE DE LA DIFFUSION DES CHLORURES [memoire\_Magister]*. 2009.
10. **Zouggar, Afaq.** *Rehabilitation du beton arme dégradé par la corrosion*. Novembre 2003.
11. **SADKI, Nizar.** *ETUDE DU RENFORCEMENT DES STRUCTURES PAR DES BARRES EN MATERIAUX COMPOSITES [MEMOIRE DE MAGISTER]*. Oran : s.n., 2010/2011.
12. **Abderezak, RABAHI.** *Contribution à l'étude de l'efficacité des matériaux composites pour le renforcement et la réparation des structures en béton armé [Thèse de doctorat]*. Tiaret : s.n., 2016.
13. **ALEND, Chawki.** *ANALYSE DES VIBRATIONS LIBRES ET FORCÉES DES PLAQUES SANDWICHES SOUS L'EFFET DE LA TEMPERATURE [MEMOIRE]*. ANNABA : s.n., 2017/2018.
14. **BOUKHABIA, Zahia et Kadi, NOURA.** *ETUDE STATIQUE D'UNE PLAQUE FGM SANDWICH PAR UNE NOUVELLE THEORIE HYPERBOLIQUE [MEMOIRE]*. SAIDA : s.n., 2017– 2018.

15. **AYACHE, Belqassim.** *Analyse des propriétés statiques et dynamiques des structures FGM épaisses en utilisant des modèles de déformation de cisaillement d'ordre élevé [THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES].* SIDI BEL ABBES : s.n., 2018-2019.
16. **GUENFOUD, Hamza.** *Modélisation par éléments finis spéciaux des structures en matériaux à gradient fonctionnel [THÈSE].* 2018-2019.
17. **Ahmed, BAKORA.** *Contribution à l'analyse du post-flambement des plaques FGM épaisses soumises à un chargement thermo-mécanique [THESE DE DOCTORAT].* SIDI BEL ABBES : s.n., 2015-2016.
18. **Mme DRIZ, Hafida.** *THESE DE DOCTORAT Etude de l'influence des paramètres géométriques et matériels sur le comportement vibratoire des plaques épaisses.* Sidi Bel Abbes : s.n., 23 /01 /2019.
19. **Aicha BESSAIM\*, Mohammed Sid Ahmed HOUARI\*, Abdelkader MEGUENI\*.,** *Analyse statique de la flexion des poutres ZrO<sub>2</sub>/ Ti-6Al-4V en P-FGM.* s.l. : Nature & Technologie, 09 Juin 2013.
20. **KAOUADJI, Mohammed Salim.** *DEGRADATIONS AU NIVEAU DE L'USINE ALZINC.* 18/04/ 2013.
21. **ABDELBASSET, CHEDAD.** *Analyse des contraintes d'interface d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque en matériau FGM.* 2015/2016.
22. **ALI, MEFTAHAH.** *CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU CHAMP DE DEPLACEMENT POUR L'ANALYSE DE LA REPOSE MECANIQUE DES STRUCTURES COMPOSITES.* 06/12/2017.
23. **Chi, Chung et.** *CONCEPTION DES PLAQUES FGM AYANT UN.* 2010.
24. **alcali-reaction-carde.** *alcali-reaction-carde.*
25. **Ambartsumian.** *Rehabilitation du beton arme.* Novembre 2003.
26. **BRAIRI, Samir.** *ANALYSE DE LA DÉGRADATION DES STRUCTURES FGM RENFORCÉES PAR FRP PRÉCONTRAINTS [Thèse].* Tlemcen : s.n., 20 Avril 2019.
27. **RABAHI, Abderezak.** *Contribution à l'étude de l'efficacité des matériaux composites pour le renforcement et la réparation des structures en béton armé [Thèse de doctorat].* Tiaret : s.n., 2016.
28. **Ait, Atmane.** *Pathologie La carbonatation.* Janv./Fev. 2006.
29. **MEHALI, KHALED.** *Vibration des plaques sandwichs en matériaux à gradient des propriétés FGM non symétrique.* 2013/2014.

30. **ITT, NADJET.** *Etude du comportement statique des structures en Matériaux avancés FGMs en utilisant la théorie de déformation de cisaillement [MEMOIRE].* Saida : s.n., juin 2017.
31. **TOUATI, Mahmoud.** *ETUDE ET ANALYSE DES DIFFERENTS TYPES DE RENFORCEMENT DANS LES POUTRES-PONTS [THESE].* Sidi Bel Abbès : s.n., 11 juin 2015.
32. **BOUKHABIA, Zahia.** *ETUDE STATIQUE D'UNE PLAQUE FGM SANDWICH PAR.* 2017– 2018.
33. **KADDOURI, Djamel Eddine.** *Analyse des effets de l'amplitude et température sur le comportement non linéaire d'une plaque annulaire sectorielle à gradient fonctionnel.* 2013 - 2014.
34. **KAMRAN, Aamir.** *Inspection détaillée des ouvrages d'art.* Juin 2018.
35. **Melle CHABANE, Safia et Melle MEKRI , Fatima.** *ETUDE DES CONTRAINTES D'INTERFACES DANS DES POUTRES POREUSES EN MATERIAUX A GRADIENT DE PROPRIETES RENFORCEES PAR COLLAGE EXTERNE DES COMPOSITES [Mémoire de fin d'études].* TIARET : s.n., 2017/2018.