

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

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

Spécialité : Travaux publics

Option : Voies et Ouvrages d'Art

Présenté par :

Boudaoud Chaimaa
Boudraa Bouchra

Sujet du mémoire

***Etude des contraintes d'interface d'une poutre en BA
renforcée par une plaque FGM poreuse : effet de la
variation du taux de distribution de porosité.***

Soutenu publiquement le 28 juin 2025 devant le jury composé de :

Mr. TLIDJI Youcef	President
Mr. BENFERHAT Rabia	Rapporteur
Mr. DRAICHE Kadda	Examineur
Mlle. OUAZIR Khatima	Examinatrice

Promotion 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

À la fin de ce travail, nous tenons à remercier **Allah**, qui nous a donné la volonté, la force et la santé qui nous ont permis de réaliser ce travail.

Nous adressons un remerciement particulier à nos chers parents pour leurs soutiens et leurs encouragements tout au long de notre parcours universitaire.

Nous remercions notre encadrant, Monsieur **Benferhat Rabia**, pour ses conseils et ses orientations tout au long de ce travail.

Tous nos remerciements à mon frère **Hamid** pour son soutien et ses encouragements tout au long de la préparation de ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant l'évaluation de cette mémoire, ainsi que pour le temps et les efforts qu'ils ont consacrés à l'examen de ce travail.

Dédicace

À celle qui a été la source de mon existence, à celle dont les prières m'ont toujours accompagnée...

À ma chère Mère, symbole de tendresse et de sacrifice, je dédie ce travail avec tout mon amour.

À mon Père bien-aimé, mon premier pilier, source de ma force et de ma persévérance.

À mes chers frères Hamid et Younes, et à ma chère sœur Fatima, pour leur soutien inconditionnel et leur présence rassurante à chaque étape de mon parcours. Merci d'être toujours là pour moi.

À tous ceux qui ont cru en moi, qui m'ont soutenue et encouragée durant les moments de doute et de fatigue.

Je dédie ce travail modeste à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'atteinte de cet accomplissement.

Chaimaa

À mon cher père,

Merçi pour ton soutien, ta patience et tes précieux conseils qui ont toujours été une source de force et de confiance pour moi.

À ma chère mère,

Toute ma gratitude pour ton amour, tes prières sincères et ta tendresse qui m'ont accompagnée tout au long de ce parcours.

À mes frères et sœurs,

Merçi pour votre présence, votre encouragement constant et votre appui inconditionnel

Et à ma sœur bien-aimée Sabrina,

Merçi pour ta douceur, ton sourire et ton soutien affectueux qui m'ont toujours réconfortée et motivée à aller de l'avant.

Je vous dédie à tous ce travail modeste en signe d'amour et de reconnaissance profonde.

Bouchra

RESUME

Les structures civiles subissent, au fil du temps, de nombreuses dégradations importantes dues à l'action simultanée de charges répétées, à des conditions environnementales sévères et au vieillissement naturel des matériaux. Ces dégradations compromettent à la fois la sécurité structurelle et les performances fonctionnelles, rendant indispensables les opérations d'entretien et de renforcement pour assurer la pérennité de l'ouvrage.

Le renforcement par plaques en matériaux à gradient de propriétés (FGM) constitue aujourd'hui l'une des solutions modernes les plus efficaces, grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques et à leur mise en œuvre plus aisée que celle des techniques conventionnelles.

Ce travail a pour objectif d'analyser le comportement des poutres en béton armé renforcées par des plaques composites en matériaux à gradient de propriétés (FGM), ainsi que de présenter un modèle théorique permettant d'estimer les contraintes normales et de cisaillement à l'interface poutre-couche de renforcement. L'influence de la porosité, introduite lors de la fabrication des plaques composites FGM, sera également étudiée à l'aide des modèles de mélange modifiés prenant en compte la distribution hétérogène des pores.

Les résultats obtenus ont été comparés et validés avec ceux qui se trouvent dans la littérature. L'influence de plusieurs paramètres notamment la fraction volumique de porosité, l'indice de puissance, l'épaisseur de la plaque de renforcement ainsi que celle de la couche adhésive a également été examinée.

Mots-clés : Poutre en BA, Renforcement des structures, Plaques FGM, Porosité, Contraintes d'interface.

ABSTRACT

Civil structures undergo, over time, significant degradation due to the simultaneous effects of repeated loading, harsh environmental conditions, and the natural aging of materials. These deteriorations compromise both structural safety and functional performance, making maintenance and strengthening operations essential to ensure the durability of the structure.

Strengthening with functionally graded material (FGM) plates is currently one of the most effective modern solutions, thanks to their excellent mechanical properties and easier implementation compared to conventional techniques.

The objective of this work is to analyze the behaviour of reinforced concrete beams strengthened with composite plates made of functionally graded materials (FGM), and to present a theoretical model to estimate the normal and shear stresses at the beam–reinforcement layer interface. The influence of porosity, introduced during the manufacturing of FGM composite plates, will also be studied using modified mixture models that take into account the heterogeneous distribution of pores.

The results obtained were compared and validated against those found in the literature. The influence of several parameters, notably the volume fraction of porosity, the power-law index, the thickness of the reinforcement plate, and that of the adhesive layer, was also examined.

Keywords: Reinforced concrete beam, Structural strengthening, FGM plates, Porosity, Interface stresses.

الملخص

تتعرض الهياكل المدنية مع مرور الزمن الى العديد من التدهورات الكبيرة الناتجة عن التأثير المتزامن للأحمال المتكررة والظروف البيئية القاسية، والشيخوخة الطبيعية للمواد. تؤثر هذه التدهورات سلبا على السلامة الإنشائية والأداء الوظيفي مما يجعل عمليات الصيانة والتقوية ضرورية لضمان ديمومة المنشأة.

وبعدّ التدعيم باستخدام صفائح مصنوعة من مواد ذات تدرج في الخصائص (FGM) من الحلول الحديثة والفعالة بفضل خصائصها الميكانيكية المتميزة وسهولة استخدامها مقارنة بالتقنيات التقليدية.

يهدف هذا العمل إلى تحليل سلوك العوارض الخرسانية المسلحة المدعمة بصفائح مركبة من مواد ذات تدرج في الخصائص FGM، بالإضافة الى تقديم نموذج نظري يمكن من خلاله تقدير الإجهادات العادية والقصية على مستوى الواجهة بين العارضة وطبقة التدعيم. كما تم دراسة تأثير المسامية، التي يتم إدخالها أثناء عملية تصنيع الصفائح المركبة FGM، باستخدام نماذج خلط معدلة تأخذ بعين الاعتبار التوزيع غير المتجانس للمسام.

وقد تم مقارنة النتائج المتحصل عليها مع تلك الموجودة في الأدبيات العلمية وتأكيد صحتها كما تم دراسة تأثير عدة عوامل مثل نسبة الحجم المسامي، ومعامل التدرج وسماكة صفيحة التدعيم وسمك الطبقة اللاصقة.

الكلمات المفتاحية: عارضة خرسانية مسلحة، تقوية الهياكل، صفائح FGM، المسامية، إجهادات الواجهة.

TABLE DES MATIERES

Remerciement.....	I
Didecace.....	II
Résumé.....	IV
Abstract.....	V
الملخص.....	VI
Table des matieres.....	VII
Liste des tableaux.....	X
Liste des figures.....	XII
Liste des abreviations.....	XV
Liste des notations.....	XVI
Introduction générale.....	1
Chapitre I: Dégradation et pathologies des structures.....	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 Les causes de dégradation.....	4
I.2.1 Dégradation chimique.....	4
I.2 Dégradations Physiques.....	8
I.2.3 Dégradations mécaniques.....	10
I.3 Les Pathologies de béton.....	10
I.3.1 La carbonatation.....	10
I.2.3 La corrosion des armatures.....	13
I.3.3 Les fissures.....	15
I.3.4 Retrait du béton.....	17
I.3.5 Le fluage.....	19
I.3.6 l'humidité.....	20
I.4 Conclusion.....	21

Chapitre II : Les méthodes de réparation et de renforcement des structures	22
II.1 Introduction.....	23
II.2 Réparation.....	23
II.2.1 Objectifs.....	23
II.3 Renforcement.....	23
II.4 Méthodes de Réparation et de renforcement	24
II.4.1 Réparation des désordres superficiels.....	24
II.4.2 Le béton projeté	24
II.4.3 Le chemisage en béton armé.....	26
II.4.4 Traitement des fissures	28
II.4.5 Réparation des différents éléments structurels	30
II.4.6 Amélioration des éléments structuraux à l'aide de chemises en acier.....	31
II.4.8 Renforcement des structures par précontrainte additionnelle.....	34
II.4.9 Tôles collées.....	35
II.4.10 Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de Matériaux composites	37
II. 5 Conclusion	38
Chapitre III : Généralité sur Les matériaux composites	40
III.1 Introduction	41
III.2 Matrices	42
III.2.1 Les matrices organiques	42
III.2.2 Les matrices métalliques	43
III.3 L'adhésif.....	43
III.4 Polymères renforcés de fibres «FRP»	43
III.4.1 Les constituants d'un polymère renforcé de fibres.....	43
III.4.2 Les renforts (les fibres).....	44
III.4.3 Les types de fibres	44

III.4.4 Caractéristiques mécaniques des fibres	46
III.4.5 Les composites «FRP»	47
III.4.6 Propriétés mécaniques des composites «FRP».....	47
III.4.7 Mise en œuvre du renfort.....	48
III.4.8 Processus de fabrication des armatures en matériaux composites FRP	49
III.4.9 Principaux avantages et inconvénients des renforts en FRP dans les applications au béton précontraint	50
III.5 Le matériau à gradients de propriétés (FGM)	50
III.5.1 Concept des matériaux à gradient de propriétés	51
III.5.2 Fabrication des FGM	52
III.5.3 Les propriétés matérielles effective des FGM (homogénéisation).....	53
III.5.4 Propriétés matérielles de la plaque P-FGM (loi de puissance).....	54
III.5.8 Propriétés matérielles de la plaque S-FGM.....	55
III.5.9. Propriétés matérielles de la plaque E-FGM.....	56
III.6 Comparaison des matériaux types FGM et les matériaux composites traditionnels ...	57
III.7. conclusion.....	58
Chapitre IV: Étude des contraintes d'interface d'une poutre en BA renforcée par une plaque FGM poreuse	59
IV. 1 Introduction	60
IV. 2 Analyse théorique.....	60
IV. 2.1. Equations d'élasticité	62
IV.2.2 La distribution des contraintes de cisaillement dans l'interface composite-poutre...	63
IV.4. Conclusion.....	79
Conclusion générale.....	81
Références bibliographiques.....	83

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I. 1: Composition de differentes eaux de mer.	7
Tableau I. 2: Effets de l'eau de mer sur le béton et les armatures	7

Chapitre III

Tableau III. 1: Caracteristiques mecaniques des fibres.	46
Tableau III. 2: Proprietes mecaniques typiques des composites.	47
Tableau III. 3: Comparaison entre les proprietes de la ceramique et du metal.	51

Chapitre IV

Tableau IV. 1: La loi de melange generale d'un materiau FGM poreux et sans poreux.	62
Tableau IV. 2 : Proprietes mecaniques des materiaux utilises.	67
Tableau IV. 3 : Comparaison des contraintes d'interface d'une poutre en beton degradee renforcee par une plaque composite et FGM.	69
Tableau IV. 4 : Effet du taux de distribution de porosite ainsi que le facteur d'endommagement D sur les contraintes d'interface d'une poutre en beton renforcee par une plaque FGM poreuse ($\alpha=0.2$).....	69
Tableau IV. 5 : Effet du taux de distribution de porosite sur les contraintes d'interface d'une poutre en beton degradee ($D=0.2$) renforcee par une plaque FGM poreuse	70
Tableau IV. 6 : Effet du taux de distribution de porosite ainsi que le type de la plaque de renforcement sur les contraintes d'interface d'une poutre en beton degradee ($D=0.2$) renforcee par une plaque FGM poreuse ($\alpha=0.2$).	71
Tableau IV. 7 : effet du taux de distribution de porosite ainsi que l'epaisseur de la plaque de renforcement sur les contraintes d'interface d'une poutre en beton degradee ($D=0.2$) renforcee par une plaque FGM poreuse ($\alpha=0.2$).	72
Tableau IV. 8 : Effet du taux de distribution de porosite ainsi que le module d' young du beton sur les contraintes d'interface d'une poutre en beton degradee ($D=0.2$) renforcee par une plaque FGM poreuse ($\alpha=0.2$).....	73
Tableau IV. 9 : Effet du taux de distribution de porosite ainsi le module d' young de l'adhesif sur les contraintes d'interface d'une poutre en beton degradee ($D=0.2$) renforcee par une plaque FGM poreuse ($\alpha=0.2$).....	74

Tableau IV. 10 : 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 dégradée ($D=0.2$) renforcée par une plaque FGM poreuse ($\alpha=0.2$) 75

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I. 1 Phenomene d'alcali-reaction.	5
Figure I. 2 : Attaques acides.	5
Figure I. 3 : Phenomene des attaques sont sulfates.....	6
Figure I. 4 : Degradations dues a l'eau de mer.	6
Figure I. 5 : Abaissement de la temperature de fusion de la glace avec la diminution du rayon des pores.....	9
Figure I. 6 : Effet de l'augmentation de volume lors de la congelation de l'eau.....	9
Figure I.7: Phenomene de la carbonatation.....	11
Figure I. 8: Les phases de carbonatation.....	12
Figure I. 9 : Exemples de la corrosion dans des ouvrages d'art (ponts) en algerie (Oum El Bouaghi et annaba 2017).....	14
Figure I. 10: Évolution de la degradation d'une structure en beton arme.....	14
Figure I. 11: Corrosion importante en sous-face.	15
Figure I. 12: Fissure structurelle dans le mur et mesure de son ouverture.	15
Figure I. 13: Fissure superficielles dans le mur et mesuree son ouverture.	16
figure i. 14 : Cette image illustre l'effet de l'humidite sur la structure de mur.	21

Chapitre II

Figure II. 1: projection par voie mouillée.....	25
Figure II. 2: Réparation en béton projeté.....	26
Figure II. 3: projection par voie sèche.	26
Figure II. 4: Chemisage en béton armé.....	28
Figure II. 5: Traitement des fissures techniques d'injection.....	29
Figure II. 6: Renforcement de poteaux circulaires et rectangulaires avec des chemises en acier	33
Figure II. 7 : Barre de recouvrement d'une base de poteau rectangulaire renforcé avec une chemise en acier).....	33
Figure II.8 : Renforcement d'un viaduc par tôles collées.....	37
Figure II. 9 : Schéma d'un composite.....	38

Chapitre III

Figure III. 1 : Structure d'un materiau composite.....	42
Figure III. 2 : Types de matrice.....	42
Figure III. 3 : Types de renfort.....	44
Figure III. 4 : Application d'un confinement CFRP sur des piles de ponts	49
Figure III. 5 : Une vue de la microstructure des FGM graduation de la microstructure avec des inclusions metallo-ceramiques : (i) microstructure a gradient regulier, (ii) vue agrandie et (iii) FGM Ceramique-Metal.....	52
Figure III. 6 : (A) Schema montrant les principes du FDM et (B) de la conception du mecanisme de la triple extrudeuse. (C) un FGM Compose d'AL ₂ O ₃ et de ZrO ₂ prepare par FDM	53
Figure III. 7 : Modele analytique pour une couche d'un materiau a gradient fonctionnel.....	54
Figure III. 8 : Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM.....	55
Figure III. 9 : Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM.....	56
Figure III. 10 : Variation du module de young de la plaque E-FGM.....	56
Figure III. 11 : Caracteristiques des materiaux composites FGM en comparaison avec les materiaux composites conventionnels.....	57
Figure III. 12 : La distribution composante des materiaux.....	58

Chapitre IV

Figure IV. 1 : Poutre simplement appuyee renforcee par des plaques en materiaux composites.....	61
Figure IV. 2 : Un segment differentiel de la poutre renforcee.....	61
Figure IV. 3: Effet de l'indice de puissance sur les contraintes d'interface d'une poutre en BA endommagee.....	76
Figure IV. 4: Effet de l'indice de puissance et le taux de porosite α sur les contraintes d'interface d'une poutre en BA endommagee.....	76
Figure IV. 5: Effet De La Variation Du Taux De Distribution De Porosite En Fonction De L'indice De Puissance K Sur Les Contraintes D'interface D'une Poutre En BA Endommagee.....	77
Figure IV. 6: Effet de la variation du taux de distribution de porosite en fonction de la variable d'endommagement D sur les contraintes d'interface d'une poutre en BA endommagee.....	77

Figure IV. 7: Effet de la variation du taux de distribution de porosité en fonction de L'épaisseur de la plaque de renforcement t_2 sur les contraintes d'interface d'une poutre en BA endommagée 78

Figure IV. 8 : Effet de la variation du taux de distribution de porosité en fonction de l'épaisseur de la colle t_a sur les contraintes d'interface d'une poutre en BA endommagée 79

LISTE DES ABREVIATIONS

FRP	Fiber reinforced polymer
CFRP	Carbone Fiber reinforced polymer
GFRP	Glass Fiber reinforced polymer
FGM	Matériau à gradient de propriétés
BA	Béton armé

LISTE DES NOTATIONS

E : Module de Young

E_c : Module de Young de la céramique

E_m : Module de Young de métal

E(z) : Module de Young en fonction de « z »

α : la porosité

D : facteur d'endommagement

k : indice de puissance

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

b₁ : Largeur de la poutre en béton armé

b₂ : Largeur de la plaque FGM

t₁ : Hauteur de la poutre en béton armé.

E₁, E₂ et E_a : Les modules d'élasticité longitudinaux de la poutre, de la plaque composite et de l'adhésif respectivement.

τ_a(x) : Contrainte de cisaillement au niveau de la couche adhésive.

G_a : Module du cisaillement.

M : Moment de la poutre hybride.

G₁ et G₂ : module de cisaillement de la poutre en béton armé et de la plaque composite.

ν₁ : Coefficient de poisson de l'acier.

ν_a : Coefficient de poisson de l'adhésif.

L : Longueur de la poutre en béton armé.

L_p : Longueur de la plaque de renforcement composite.

N₁(x) et N₂(x) : Les forces axiales de en béton armé et de la plaque composite respectivement.

t_a : L'épaisseur de la couche adhésive

b_a : Largeur de la couche adhésive.

t₂ : Hauteur de la plaque FGM

Introduction générale

Introduction générale

Un ouvrage de génie civil est dimensionné pour une durée de vie de cent ans en moyenne. Toutefois, plusieurs types de désordres viennent réduire cette durée de vie prévisionnelle et aujourd'hui, un ouvrage sur trois nécessite une maintenance pour assurer la sécurité des usagers. La maintenance des ouvrages de génie civil consiste à les protéger en assurant une meilleure étanchéité ou en limitant la corrosion, à les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance dues à la fissuration, à les renforcer en améliorant les performances et la durabilité des ouvrages. C'est un problème de plus en plus préoccupant dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est de plus en plus élevé et les conditions de réparation de plus en plus difficiles. Parmi les techniques disponibles, l'une des plus efficaces pour les désordres structurels est la réparation de structures en béton armé dégradées par placage extérieur en acier. Toutefois, un inconvénient majeur lié à la difficulté de manipulation des plaques en acier compte tenu de leur poids, ainsi que les problèmes de corrosion limite l'utilisation de cette méthode. Depuis une dizaine d'année, une alternative est proposée : il s'agit de renforcer ou de réparer les ouvrages en béton par des matériaux composites à matrice organique collés extérieurement sur des structures dégradées. Les matériaux composites, en particulier à base de fibres de carbone, de par leur rigidité spécifique, présentent un grand intérêt pour la réparation. De plus, malgré leur prix élevé, ils présentent un avantage économique car ils peuvent être mis en œuvre directement sur les structures par moulage au contact, procédé appelé aussi polymérisation in-situ ou stratification directe. Ceci permet de réduire considérablement les coûts liés à la manipulation des matériaux ainsi que les problèmes liés aux interruptions des activités des ouvrages réparés.

Les matériaux composites avancés ou couramment appelés les FGM (Matériau à gradient de propriétés) sont une nouvelle gamme de matériaux composites ayant une variation graduelle et continue des fractions volumiques de chacun des constituants (en général, métal et céramique) à travers l'épaisseur, induisant des changements en conséquence des propriétés thermomécaniques globales de l'élément structural qu'ils constituent. Ils ont été conçus pour pallier aux problèmes engendrés par des environnements thermiques sévères. La réussite qu'ont connue ces matériaux dans leur utilisation dans ces milieux à pousser les industriels et les chercheurs à étendre leurs champs d'application à d'autres espaces notamment en génie civil.

Par conséquent, les matériaux à gradient de propriétés (FGM), utilisés sous diverses formes dans des environnements sollicités mécaniquement ou thermiquement, peuvent présenter des défauts internes inhérents à leur processus de fabrication. Parmi ces défauts, la porosité

constitue l'un des plus critiques. Elle se manifeste sous forme de vides ou de cavités microscopiques qui apparaissent au sein de la matrice du matériau durant les étapes de mise en forme, telles que le frittage, la pulvérisation thermique ou la fabrication additive.

La présence de porosités peut entraîner une dégradation significative des propriétés mécaniques, notamment une réduction de la résistance, de la rigidité, de la ténacité et de la durabilité des composants FGM. Ces effets peuvent compromettre l'intégrité structurelle des pièces au cours de leur durée de service.

L'objectif principal de ce travail est de présenter l'influence de la variation du taux de distribution de porosité sur les contraintes d'interfaces des poutres en béton armé renforcée par une plaque FGM poreuse.

Ce mémoire contient quatre chapitres principaux :

Le premier chapitre présente les différents types de dégradations causées par les fissures dans les ouvrages en béton armé, en les classant selon leur origine chimique, physique ou mécanique.

Le deuxième chapitre explore les différentes techniques de réparation, qu'elles soient non structurales ou structurales, des ouvrages en béton armé. L'une des techniques les plus couramment utilisées pour la réhabilitation est la réparation et le renforcement par collage à l'aide de plaques métalliques. Cependant, en raison de certains inconvénients liés à l'acier, l'utilisation de matériaux composites à base de fibres de carbone peut offrir une solution rapide et efficace pour la réparation des structures en béton armé.

Le troisième chapitre présente les matériaux composites classiques et avancés, leurs méthodes de mise en œuvre, leurs principales propriétés et leurs applications dans le domaine du génie civil.

Le quatrième chapitre vise à analyser l'impact de la variation du taux de distribution de porosité sur les contraintes d'interfaces dans une poutre en béton armé renforcée par une plaque FGM poreuse, en mettant l'accent sur les différents paramètres influençant les contraintes normales et tangentielles.

Une conclusion générale regroupe les principaux résultats trouvés ainsi que les quelques perspectives.

Chapitre I

Dégradation et pathologies des structures

I.1 Introduction

La dégradation d'une structure est la traduction d'une évolution lente et irréversible de ses variables d'état, conduisant à la diminution des marges de sûreté nécessaires pour assurer son bon fonctionnement. La modélisation de la dégradation des structures est essentielle pour la maîtrise des risques industriels, pour la gestion de leur durée de vie, pour l'optimisation des opérations d'inspections, de maintenance et de réparation, ainsi que pour le choix des engagements sur la garantie et la qualité des équipements. Toutefois, le manque de données, les incertitudes sur les propriétés physiques et les variations des conditions d'exploitation conduisent à des incertitudes plus ou moins importantes qui se répercutent sur l'évaluation de l'état de dégradation réel. Ceci rend difficile la prise de décision quant à une intervention appropriée. La situation est aggravée lorsque les enjeux sont importants, les données trop rares, la prévision très éloignée de l'observation et lorsque les conditions d'exploitation ne sont pas bien contrôlées. Ce constat ne fait qu'accroître l'intérêt de disposer d'une méthodologie de modélisation de la dégradation et de la prévision de la durée de vie des structures (IMRD, 2007).

I.2 Les causes de dégradation

I.2.1 Dégradation chimique

I.2.1.1 L'alcali-réaction

Le phénomène d'alcali-réaction résulte de l'action des alcalins solubles (oxyde de sodium Na_2O et oxyde de potassium K_2O) du béton sur une certaine forme de silice réactive, en présence d'eau.

Il correspond à un ensemble de réactions chimiques complexes qui peuvent se déclencher entre certaines phases minérales contenues dans les granulats et la solution interstitielle fortement basique du béton, lorsque plusieurs conditions sont réunies simultanément : présence d'une forme de silice des granulats dite « potentiellement réactive », des alcalins du béton et de l'eau en quantité suffisante. Il s'agit de réactions internes au béton mettant en jeu essentiellement les éléments présents à l'origine dans le béton et un apport d'eau externe. En l'absence de précaution, cette pathologie peut apparaître dans les parties d'ouvrages les plus sévèrement exposées à l'humidité, en général au bout de quelques années (voire plusieurs dizaines d'années). On observe la formation d'un gel gonflant qui peut provoquer, en particulier, au cœur du béton, des déformations et une microfissuration du matériau. Les contraintes expansives génèrent, si elles dépassent la résistance en traction du béton, un décollement à l'interface pâte-granulats et la formation de microfissures à l'interface béton/armatures qui se matérialisent en surface par une fissuration orientée selon la direction des aciers.

Trois conditions simultanées sont nécessaires pour amorcer et entretenir les réactions de ce phénomène exceptionnel :

- Un environnement fortement humide,
- une teneur en alcalins solubles dans la solution interstitielle élevée et dépassant un seuil critique,
- La présence dans le béton de silice réactive en quantité suffisante (apportée par des granulats potentiellement réactifs) (Guiraud, P, 2018).



Figure I.1 : Phénomène d'alcali-réaction.

I.2.1.2 Attaques Acides

Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de Ciment (la phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé). Il peut donc présenter une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries agroalimentaires ou industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides Minéraux, mais aussi les eaux pures.



Figure I. 2 : Attaques acides.

I.2.1.3 Attaque sulfatique

Il a été démontré que l'attaque du béton par les sulfates résulte d'une réaction chimique, en présence d'eau, entre les ions sulfates et les aluminates de calcium hydratés, ainsi que certains composants de l'hydroxyde de calcium présents dans la pâte de ciment durcie. Ces réactions conduisent à la formation de produits tels que l'hydrate de sulfoaluminate de calcium, communément appelé étrangéité, et l'hydrate de sulfate de calcium, mieux connu sous le nom de gypse. Ces composés ont des volumes nettement supérieurs à ceux des réactifs initiaux, ce qui engendre des contraintes internes pouvant fissurer la pâte de ciment et, à terme, provoquer la désintégration du béton (Swenson, E. G., 1974).

L'efficacité destructrice de cette réaction a été confirmée à plusieurs reprises par des études expérimentales sur des mortiers et des bétons exposés à des environnements sulfatés.

Les ions sulfates sont fréquemment présents dans les zones agricoles, en raison de l'utilisation intensive d'engrais riches en sels, mais peuvent également provenir des fumées industrielles ou des rejets de l'industrie chimique. En réagissant avec la pâte de ciment, plusieurs produits peuvent se former, en fonction de la concentration en sulfates, du pH du milieu et de la température. La formation de ces composés entraîne une expansion du volume interne, créant des contraintes de gonflement susceptibles de fissurer et d'affaiblir le béton.

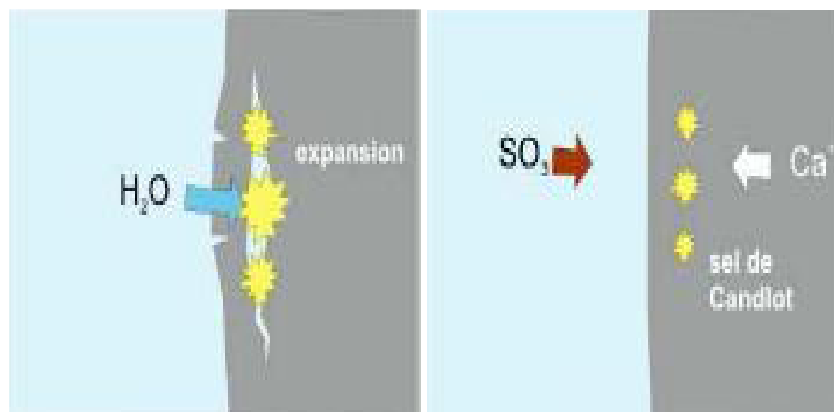


Figure I.3 : Phénomène des attaques sont sulfates.

I.2.1.4 L'eau de mer

L'eau de mer est un des milieux les plus agressifs qui soient. L'attaque du béton et des aciers est le résultat de réactions des éléments nocifs de l'eau de mer et les constituants du béton ces réactions sont plus ou moins simultanées.

- Les importants éléments nocifs, pour le béton armé, que contient l'eau de mer sont surtout :

Les chlorures, le magnésium, les sulfates de magnésium, de calcium et de potassium.... L'eau de mer contient aussi un peu de CO₂ dissous.

- L'eau de mer est une solution légèrement basique (pH varie entre 7,5 et 8,4), les teneurs en sels de quelques mers et océans sont donnés au Tableau (à titre indicatif).

Tableau I. 1: Composition de différentes Eaux de Mer. (Sebsadji, S. Pathologies des bétons)

Plan d'eau	Salinité (g/l)	Cl ⁻	Br ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ₂ ⁺	Mg ₂ ⁺
Mer Baltique	3 à 8	-	-	-	-	-	-	-	-
Mer Noire	18.3 à 22.2	-	-	-	-	-	-	-	-
Mer Blanche	26.0 à 29.7	-	-	-	-	-	-	-	-
Océan Atlantique	33.5 à 37.4	55.3	0.2	7.7	0.2	30.6	1.1	1.2	3.7
Océan Pacifique	34.5 à 36.9	-	-	-	-	-	-	-	-
Océan Indien	35.5 à 36.7	-	-	-	-	-	-	-	-
Mer Méditerranée	38.4 à 41.2	-	-	-	-	-	-	-	-
Mer Rouge	50.8 à 58.5	-	-	-	-	-	-	-	-
Lac Ontario	72	-	-	-	-	-	-	-	-
Mer Caspienne	126.7 à 185	-	-	-	-	-	-	-	-
Mer Morte	192.2 à 260	-	-	-	-	-	-	-	-
Lac Elton	265	-	-	-	-	-	-	-	-



Figure I. 4 : Dégradations dues à l'eau de mer (Ait Amar, cour pathologie. 2019-2020)

Tableau I. 2: Effets de l'eau de mer sur le béton et les armatures.

Béton	Causes	Aciers	Causes
→ Perte des propriétés liantes	→ Magnésium	→ Corrosion	→ Attaque par les Chlorures
→ Formation d'ettringite	→ Sulfates		→ Carbonatation du béton
→ Carbonatation du béton	→ Gaz carbonique (CO ₂)		
→ Abrasion, fissuration...	→ vagues, sable, gel/dégel, mouillage/séchage...		

I.2.1.5 L'action des chlorures spécifique à certains environnements

L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton, comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime (zone de marnage, surfaces soumises aux embruns).

Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion ou migrer par capillarité à l'intérieur du béton, franchir la zone d'enrobage, atteindre les armatures, et provoquer des corrosions (par mécanisme de dissolution du métal suivant une réaction d'oxydoréduction : métal ions métal $Mn^+ + n$ électrons), d'abord ponctuelle (corrosion par piqûres) puis généralisée à toute la surface de l'acier. La vitesse de pénétration des chlorures dépend aussi de la porosité du béton. Elle décroît lorsque le rapport eau/ciment diminue. La corrosion s'amorce dès que la teneur en chlorures au niveau des armatures atteint un certain seuil de dé passivation. Ce seuil est fonction du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures ; il est de l'ordre de 0,4 à 0,5 % par rapport au poids du ciment. Il est atteint plus rapidement si le béton est carbonaté.

I.2.2 Dégradations Physiques

I.2.2.1 Cycles de gel-dégel

Quand la Température diminue dans un béton, l'eau se transforme progressivement en glace. La formation de glace commence dans les plus gros capillaires pour se propager dans les pores de plus en plus petits à mesure que la température s'abaisse (voir Figure I.5).

L'accroissement de volume accompagnant la transformation de l'eau se trouvant dans les capillaires du béton en glace (9 %) + mouvement de l'eau qui n'a pas encore gelé = pressions

Hydrauliques importantes qui si elles dépassent la résistance à la traction du béton causent la dégradation du béton = la fissuration interne, surtout si les chutes de températures du béton sont rapides et fréquentes (voir Figure I.6).

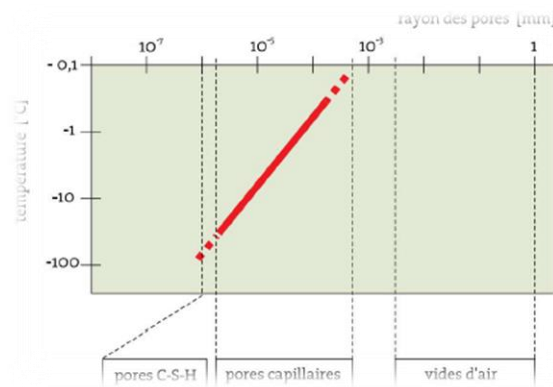


Figure I. 5 : abaissement de la température de fusion de la glace avec la diminution du rayon des pores.



Figure I. 6 : Effet de l'augmentation de volume lors de la congélation de l'eau.

I.2.2.2 Action des sels de déverglaçage

Les dommages causés au béton par les sels de déverglaçage peuvent avoir plusieurs origines :

- Saturation en eau de la surface du béton,
- Choc thermique provoqué dans les couches superficielles du matériau : les sels puisent dans le béton la chaleur nécessaire à faire fondre la glace qui le recouvre provoquent une brusque chute de la température superficielle du béton fortes tensions entre la couche de surface et les couches inférieures dont la température n'a pas varié résultat : éclats ou écaillage de la Surface,
- Pression osmotique : l'eau qui gèle dans le béton est en réalité une solution saline pressions osmotiques.

Remarque : l'effet destructeur des sels de déverglaçage est plus dangereux que l'action du gel seul, mais il est aussi plus limité.

I.2.3 Dégradations mécaniques

I.2.3.1 Les chocs

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

I.2.3.2 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 microfissurations et des éclatements du béton sous l'effet de la chaleur les ferraillements se dilatent et perdent une partie importante de leur résistance.

I.2.3.3 fatigue

La fatigue d'un élément signifie son endommagement sous l'effet d'efforts répétés ou cycliques. Alors qu'il est conçu pour résister à des efforts donnés, l'application répétée d'efforts plus faibles peut provoquer sa rupture.

Les endommagements par fatigue se traduisent par une dégradation de l'adhérence entre le béton et les armatures entraînant l'apparition d'une fissuration pouvant affecter la durée de vie de l'ouvrage, voire des déformations irréversibles sous l'effet des charges de service. Ils peuvent entraîner éventuellement la rupture quand l'assemblage atteint sa limite d'endurance.

Le degré d'endommagement dépend de nombreux facteurs comme :

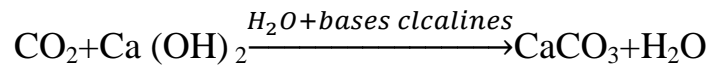
- L'amplitude de la sollicitation (le nombre et l'intensité des cycles de chargement ou déformation imposée),
- La variabilité des charges appliquées,
- Le degré de fissuration entraînant une modification des propriétés.

I.3 Les Pathologies de béton

I.3.1 La carbonatation

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel des matériaux à base de liant minéral qui conduit à la formation de carbonates de calcium par réaction entre les composés des ciments (principalement la portlandite) et le dioxyde de carbone atmosphérique (CO₂), présent dans l'air à un taux moyen de 0,03 % en volume. Ce taux est plus important en milieu urbain qu'en milieu rural. Cette réaction entraîne la consommation de bases alcalines

Présentes dans la solution interstitielle des bétons aboutissant à une diminution du pH qui passe d'une valeur de 13 à une valeur inférieure à 9. D'un point de vue chimique cette réaction se présente ainsi :



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 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 CO_2 atmosphérique à travers la couche de carbonates formée. Elle suit donc une loi linéaire en fonction de la racine carrée du temps. 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 d'évolution du phénomène dans le temps.



Figure I.7: Phénomène de la carbonatation.

I.3.1.1 Le mécanisme de carbonatation

Le CO_2 présent dans l'atmosphère peut être à l'origine d'une carbonatation des matrices cimentaires. Il se diffuse alors sous forme gazeuse dans la porosité du béton ou du mortier et se dissout en formant des acides au contact de la solution interstitielle contenue dans la pâte de ciment (avec une prédominance de H_2CO_3 , HCO_3^- ou CO_3^{2-} suivant la gamme de pH). Ce phénomène a pour conséquence d'abaisser le pH du milieu et de conduire à la dissolution des hydrates du ciment. L'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) est notamment affecté.

Plus communément appelé portlandite, cet hydrate joue un rôle fondamental dans le maintien d'un pH élevé protégeant les armatures du béton armé ou prévenant la formation de micro-organismes. Lorsque la portlandite a été entièrement consommée, ou qu'elle n'est plus suffisamment accessible pour réguler le pH par effet tampon, le milieu s'acidifie, permettant ainsi la corrosion des armatures. La carbonatation des silicates de calcium hydratés (C-S-H) est également possible. La carbonatation des C-S-H, qui contribue de manière non négligeable à la fixation du CO_2 dans la matrice cimentaire, est à l'origine d'importantes évolutions de la microstructure. Les C-S-H se carbonatent suivant un mécanisme progressif de décalcification, les ions calcium venant se précipiter dans la porosité avec les ions carbonates sous forme de carbonate de calcium.

La décalcification conduit à la formation d'un gel de silice très amorphe (fortement polymérisé) et plus ou moins hydraté. La carbonatation de la portlandite et des C-S-H est inéluctable, même pour des concentrations très faibles en CO_2 (0,03 %). La concentration en CO_2 venant simplement contrôler la vitesse à laquelle ce phénomène va avoir lieu et la vitesse avec laquelle il pénétrera dans le matériau (on parle alors de cinétique de pénétration)

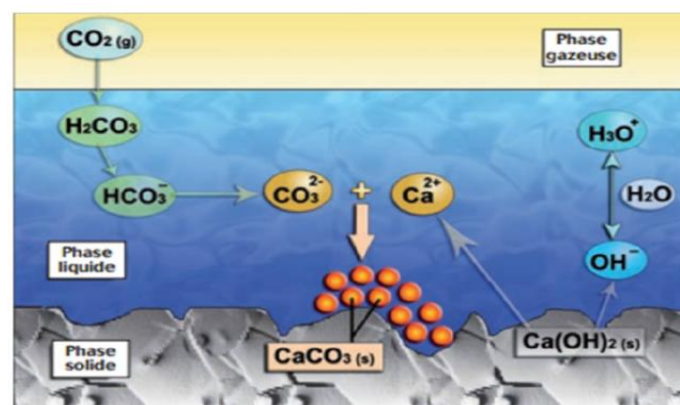


Figure I. 8: Les phases de carbonatation.

I.3.1.2 Les conséquences de la carbonatation

La principale conséquence de la carbonatation est l'amorce d'un phénomène de corrosion des armatures du béton armé ou précontraint lorsque le front de carbonatation est au moins égal à leur profondeur d'enrobage. Les désordres associés correspondent alors pour l'essentiel à des fissures et à des épaufrures (expulsion du béton d'enrobage) consécutives aux gonflements provoqués par la formation d'oxydes et hydroxydes de fer sur les armatures. Ces dernières prouvent alors montrer des diminutions de section importantes ou, au stade ultime, des ruptures ayant des conséquences graves sur la capacité portante des éléments de structure. Une conséquence secondaire du phénomène de carbonatation correspond à une densification de la zone carbonatée par rapport au béton sain. Cette densification, qui ne revêt aucun caractère pathologique, peut, dans certaines conditions, conduire à une diminution relative de 10 à 15 % de la porosité de la zone carbonatée, formant ainsi une barrière diffusion elle limitant les phénomènes de transfert.

I.3.2 La corrosion des armatures

En plus de son vieillissement à l'intérieur du béton sous l'action d'agents agressifs tels que l'eau ou de réactifs chimiques, l'acier se corrode. Autrement dit, il se transforme en oxydes, sulfures, carbonates, etc., ou en une autre forme plus stable par rapport au milieu environnant. Cela entraîne systématiquement aux changements et chutes de la performance mécanique et toutes les caractéristiques se dégradent. L'origine de ce processus électrochimique est la carbonatation en plus de la pénétration des ions qui fournissent des solutions de faible pH (acides) comme les chlorures. Ce phénomène dépend de la présence simultanée de divers facteurs : les paramètres physiques (la température, la densité, un taux hygrométrique important, l'épaisseur du béton d'enrobage ...etc.), les sollicitations mécaniques (les contraintes, les chocs....), la microstructure et les compositions chimiques du matériau béton et de l'environnement. Les dégradations se manifestent sur les ouvrages, elles sont très visibles on cite les fissurations, l'éclatement de béton, des taches de rouilles engendrées une perte de section d'acier. Tous ces désordres favorisent la rupture fragile et la perte de capacité portante des structures.

La figure I.9 montre des exemples réels de la corrosion dans des ouvrages d'art (Ponts) en Algérie, et des symptômes pathologiques inspectés récemment (2017), elles sont plus aux moins graves et menacent la fonctionnalité de ces structures.



Figure I. 9 : Exemples de la corrosion dans des ouvrages d'art (Ponts) en Algérie

(Oum El Bouaghi et Annaba, 2017)

I.3.2.1 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 épaufures, des décollements, ...

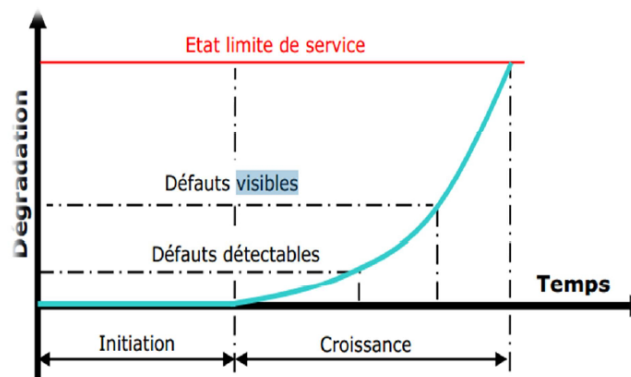


Figure I. 10: Évolution de la dégradation d'une structure en béton armé.

I.3.2.2 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_2 atmosphérique.

L'autre facteur étant les chlorures, le 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.



Figure I. 11: Corrosion importante en sous-face d'une poutre de pont.

I.3.3 Les fissures

Les fissures sur une construction sont très courantes et n'impactent généralement que l'esthétisme d'un bâtiment. Certaines fissures peuvent cependant être dangereuses sans la mise en place d'un traitement adéquat.

I.3.3.1 Les différents types de fissures

Les fissures sur les constructions sont généralement divisées en deux types : les fissures structurelles et les fissures superficielles.

➤ Les fissures structurelles

Les fissures structurelles peuvent apparaître pour plusieurs raisons telles qu'une conception incorrecte ou une surcharge des éléments structurels du bâtiment. Ce type de fissure représente un véritable risque pour l'intégrité structurelle de la construction. Il s'agit habituellement de fissures dont l'épaisseur est supérieure à deux millimètres. Une fissure structurelle peut émerger sur les murs de fondation, les poutres, les dalles ou les poteaux (Adrien, 2021).



Figure I. 12: Fissure structurelle dans le mur et mesure de son ouverture.

➤ Les fissures superficielles

Les fissures superficielles ne menacent pas l'intégrité structurelle d'une construction. Celles-ci sont généralement causées par le retrait du béton durant le processus de séchage. Il s'agit dans

la plupart des cas de fissures très fines qui ne font pas plus que deux millimètres d'épaisseur. Ces fissures ne sont néanmoins pas toujours sans gravité. Certaines fissures superficielles verticales peuvent notamment provoquer des fuites dans les étages inférieurs d'une construction. Une fissure superficielle peut se transformer en fissure structurelle sans un traitement adéquat. Cela se produit lorsque de l'eau s'infiltré dans la fissure, détériore le béton interne et élargit la fissure (Adrien, 2021).



Figure I. 13: Fissure superficielles dans le mur et mesurée son ouverture.

I.3.3.2 Les causes des fissures

Les causes des fissures peuvent être variées et multiples. Ainsi, ce n'est pas forcément une cause isolée qui va être soulevée, mais parfois une combinaison de deux ou trois réactions en chaîne. Entre affaissement du sol, infiltration d'eau, voire catastrophe naturelle.

- **Retrait thermique :** Les variations de température peuvent entraîner une expansion ou une contraction du béton provoquant des fissures.
- **Retrait par séchage :** La perte d'humidité du béton après le coulage peut entraîner un retrait et des fissures.
- **Surcharge :** Une charge excessive sur la structure en béton peut provoquer des fissures en raison du dépassement de la capacité de charge prévue.
- **Corrosion :** La corrosion des armatures en acier due à l'exposition à l'humidité et aux intempéries peut entraîner des fissures dans le béton.
- **Erreurs de conception ou de construction :** Des erreurs dans la conception de la structure ou lors du coulage et de la construction peuvent entraîner des fissures.
- **Tassement différentiel :** Un tassement inégal des fondations peut provoquer des contraintes supplémentaires et des fissures dans la structure.
- **Réactions chimiques :** Des réactions chimiques telles que la réaction alcali-silice peuvent provoquer des fissures dans le béton.

- **Effets environnementaux :** L'exposition du béton à des conditions environnementales sévères, comme le gel et le dégel, peut entraîner des fissures.

I.3.4 Retrait du béton

Le retrait du béton correspond à des variations dimensionnelles (contraction) de la pâte de ciment, mettant en jeu des phénomènes hydriques, thermiques, ou mécaniques, à diverses échéances (avant, pendant ou après la prise du béton) et qui peuvent provoquer l'apparition de fissures.

I.3.4.1 Généralités sur le retrait

Il provoque son raccourcissement et donc engendre des contraintes de traction qui peuvent générer des fissures dans le béton au jeune âge (lors de la phase d'hydratation, la résistance de la pâte cimentaire est faible) ou au cours de la vie de l'ouvrage.

Nota : Les déformations de retrait sont des grandeurs sans dimension, exprimées en 10^{-4} .

La fissuration se forme dès que les contraintes de traction issues du retrait sont supérieures à la résistance en traction du béton. La souplesse du béton lui permet en général de s'adapter au retrait sans fissuration visible. S'il est généralement impossible de supprimer les retraits, il est par contre possible d'en limiter l'amplitude et donc de maîtriser les risques de fissuration et de réduire l'ouverture de ces fissures. Le ferrailage de peau, par exemple, ne peut pas empêcher le retrait, mais il permet de répartir les fissures à la surface du béton. En fait le béton est soumis à plusieurs types de retrait qui peuvent se superposer, phénomènes complexes qui dépendent :

- de la formulation du béton,
- Type et dosage en ciment : nature minéralogique du clinker,
- Rapport E/C : rôle très important,
- Classe de résistance du béton,
- Taille des granulats : le retrait augmente si la taille des granulats diminue,
- de la forme et géométrie de l'ouvrage et des dimensions des parties d'ouvrage,
- des conditions climatiques : température, vent, humidité relative,
- des conditions de réalisation : la cure joue un rôle primordial,
- des conditions d'hygrométrie pendant la vie de l'ouvrage.

I.3.4.2 Origines du retrait mécanique, thermique ou hydrique

Le béton, matériau poreux, se déforme dès qu'il est soumis à des actions mécaniques, thermiques ou hydriques.

➤ **Actions mécaniques**

- Forces extérieures ponctuelles ou réparties,

- Déplacements imposés : tassements d'appui, dilatations, ...

Ces actions sont prises en compte dans les normes de dimensionnement des ouvrages.

➤ **Actions thermiques**

- Augmentation de la température produite dans la masse du béton par la réaction exothermique d'hydratation du ciment :

Ces actions sont d'autant plus sensibles que la pièce est massive et que la vitesse de dégagement de chaleur est importante par rapport à la cinétique de diffusion de la chaleur vers l'extérieur.

Nota : La chaleur d'hydratation du ciment dépend de sa composition chimique (elle augmente avec la teneur) et de sa finesse de broyage. Selon le type de ciment, la quantité totale de chaleur dégagée est comprise entre 150 et 450 Joules par gramme de ciment. Le dégagement de chaleur est d'autant plus grand que la classe de ciment est élevée.

- Variation de températures appliquées en surface,
- d'origine naturelle : climat,
- d'origine industrielle : étuvage,

➤ **Actions hydriques**

- Variation d'humidité extérieure,
- d'origine naturelle : climat,
- d'origine industrielle : décoffrage,
- Apport d'eau : pluie, humidité,
- Variation de l'hygrométrie interne,

I.3.4.3 Types de retraits plastique, endogène, thermique ou dessiccation à long terme

- En fait il n'y a pas qu'un seul retrait du béton. On distingue 4 types de retrait dont les effets peuvent se cumuler et qui peuvent créer des fissures à la surface des parements ou dans la masse du béton,
- Avant ou pendant la prise : 1 h à 24 h,
- Retrait plastique,
- Retrait endogène ou d'auto dessiccation,
- Après la prise : Quelques jours à quelques semaines, voire plusieurs mois,
- Retrait thermique,
- Retrait de dessiccation à long terme,
- Nota : Les retraits thermiques et d'auto dessiccation concernent la masse du béton. Les retraits plastiques et de dessiccation concernent les parements,

- Chacun de ces retraits est potentiellement source de fissuration. L'examen des conditions propres à chaque type de retrait permet d'estimer s'il y a un risque d'apparition de fissures. Certains de ces retraits sont pris en compte dans le dimensionnement des armatures,
- L'importance respective des différents retraits dépend en particulier de la formulation des bétons et de la géométrie de la partie d'ouvrage concernée,

Exemples :

- le retrait de dessiccation est important pour des éléments minces,
- le retrait thermique est prépondérant dans les pièces massives,
- le retrait endogène est négligeable pour les bétons de résistances courantes et il est important pour les bétons à hautes résistances,
- le retrait de dessiccation des bétons courants est plus important que celui des bétons à hautes résistances.

I.3.5 Le fluage

Le fluage est la faculté du béton à se déformer lorsqu'il est soumis à un chargement mécanique maintenu constant dans le temps. Suivant le mode de conservation du béton durant le chargement, on définit deux types de fluage : fluage de dessiccation et fluage propre. La déformation de fluage est influencée par plusieurs facteurs tels que l'âge du béton au moment de chargement, l'intensité du chargement, la température, l'humidité relative, la géométrie de l'élément ainsi que par les paramètres du béton (formulation et propriétés mécaniques). Les études relatives au comportement différé du béton incorporant des granulats recyclés montrent que la déformation de fluage est supérieure à celui du béton témoin formulé avec des granulats naturels (Pablo PEÑA ,2020).

I.3.5.1 Effets du Fluage

Le fluage d'un béton ordinaire n'affecte pas par lui-même la résistance de ce dernier quoique, Sous l'influence de contraintes très élevées, le fluage hâte l'apparition de la déformation limite à laquelle se produit la rupture. L'influence exercée par le fluage sur la résistance de rupture d'une poutre en béton armé à portée simple soumise à une charge permanente est insignifiante, par contre le fléchissement augmente considérablement et ce fait peut, dans de nombreux cas, constituer une considération d'importance majeure lors du design. Un autre exemple des effets nuisibles du fluage réside dans l'influence qu'il exerce sur la stabilité d'une structure du fait de l'accroissement de la déformation et du transfert subséquent de charge à d'autres éléments.

Ainsi même dans le cas où le fluage n'affecte pas la résistance de rupture de l'élément dans lequel il se produit, ses conséquences peuvent être extrêmement sérieuses concernant le comportement de la structure dans son ensemble.

La perte de précontrainte due au fluage est bien connue, et on lui a attribué les échecs intervenus lors des premiers essais de précontrainte. C'est seulement avec l'introduction de l'acier à haute tension que la précontrainte du béton s'est révélée une opération avantageuse.

Les effets du fluage peuvent donc être nuisibles. Dans l'ensemble, cependant, le fluage contrairement au retrait, offre l'avantage de soulager les concentrations de contraintes et a contribué au succès remporté par le béton comme matériau de construction (Feldman., 1974).

I.3.6 l'humidité

Quelles sont les causes de l'humidité dans un bâtiment en béton ?

➤ Remontées capillaires

Les remontées capillaires sont un phénomène insidieux qui menace l'intégrité de tout bâtiment en béton, qu'il soit récent ou ancien. Ce processus survient lorsque l'eau du sol humide est aspirée par capillarité à travers les pores des matériaux de construction, remontant des fondations jusqu'aux murs intérieurs.

La nature du terrain joue un rôle clé dans l'ampleur de ce problème : un sol argileux ou mal drainé, par exemple, favorise l'accumulation d'humidité. Cette humidité excessive se fraye un chemin à travers le béton, causant des dégâts.

Les variations de température accentuent également ce phénomène, notamment en période de gel, lorsque l'eau présente dans le béton gèle puis dégèle, augmentant la pression interne.

➤ Fondations jusqu'aux murs intérieurs

La nature du terrain joue un rôle clé dans l'ampleur de ce problème : un sol argileux ou mal drainé, par exemple, favorise l'accumulation d'humidité. Cette humidité excessive se fraye un chemin à travers le béton, causant des dégâts. Les variations de température accentuent également ce phénomène, notamment en période de gel, lorsque l'eau présente dans le béton gèle puis dégèle, augmentant la pression interne. L'humidité relative de l'air intérieur vient encore compliquer la situation, favorisant la condensation.

➤ Infiltrations et défauts d'étanchéité

Les infiltrations d'eau dans un bâtiment sont souvent le résultat d'un défaut d'étanchéité au niveau des fondations, des fissures ou des raccords de murs. L'eau s'infiltré lentement dans les matériaux de construction, particulièrement dans le béton et la maçonnerie poreuse, et finit par causer des dégâts considérables à long terme. Une mauvaise mise en œuvre de l'étanchéité ou

l'absence de barrière hydrofuge peut transformer un terrain humide en un véritable problème pour votre maison.



Figure I. 14 : Cette image illustre l'effet de l'humidité sur la structure de mur.

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les différentes pathologies du béton, qui constituent souvent la cause principale de l'effondrement des structures. Nous avons également examiné les causes de ces pathologies et leur classification, en mettant l'accent sur la nécessité de traiter les pathologies graves afin d'éviter leur aggravation. Cependant, la détérioration des structures en béton ne se limite pas aux problèmes visibles ; elle résulte d'une combinaison de plusieurs facteurs qui affectent leurs performances et leur comportement au fil du temps, rendant leur durabilité permanente impossible. Ainsi, le recours aux technologies de diagnostic et d'inspection devient indispensable pour assurer le suivi de l'état des structures tout au long de leur cycle de vie, permettant ainsi de détecter précocement les anomalies et de mettre en place les mesures correctives appropriées. La préservation de la durabilité du béton nécessite une compréhension approfondie des mécanismes de dégradation, des causes de détérioration et des moyens efficaces pour les surveiller et les réparer. Étant donné les coûts élevés des travaux de génie civil, le renforcement et la réhabilitation des structures s'avèrent essentiels pour prolonger leur durée de vie et assurer leur pérennité, un aspect qui sera détaillé dans le deuxième chapitre.

Chapitre II

Les méthodes de réparation et de renforcement des structures

II.1 Introduction

Recourir aux techniques de renforcement et de réparation des structures en béton armé ou précontraint est devenu de plus en plus fréquent. En effet, partout dans le monde, il existe des bâtiments à usage d'habitation ou destinés aux activités industrielles, à la logistique ou au transport, des ouvrages d'art, etc. qui nécessitent d'être renforcés ou réhabilités pour de très nombreuses raisons. D'une part, leurs structures porteuses, de qualité, de capacité et de fonction très variables, vieillissent et se dégradent toutes avec le temps. Environ 85 à 90 % des structures construites dans le monde ont déjà atteint une durée de vie supérieure à 20 ans et un grand nombre d'entre elles devraient ou devront être remplacées ou réparées du fait de leur état d'endommagement. D'autre part, des erreurs pouvant avoir été commises lors de la phase de conception ou de construction, certaines structures doivent être renforcées ou remises à niveau avant de pouvoir être utilisées. Enfin, des modifications d'usage pour un bâtiment ou un ouvrage, peuvent imposer des transformations (augmentation significative de la demande dans le secteur des transports par exemple) si de nouvelles exigences ou une évolution des normes imposent de renforcer les structures correspondantes. (Gaël Le Bloa ,2023).

II.2 Réparation

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

II.2.1 Objectifs

- Rendre la forme initiale à l'élément en béton
- Comblé une cavité accessible de l'extérieur (attaque chimique, défaut de mise en œuvre)
- Restaurer ou améliorer l'état de surface
- Protéger l'armature.

II.3 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

II.4 Méthodes de Réparation et de renforcement

II.4.1 Réparation des désordres superficiels

Si les désordres de la partie d'ouvrage en béton sont superficiels et si les armatures ne sont pas corrodées, l'opération de réparation comprend :

- Une préparation de surface avec élimination du béton dégradé et de toute trace de pollution ;
- Le traitement éventuel des armatures contre les risques de corrosion ;
- La reconstitution de l'enrobage des armatures et de la géométrie de la pièce par un ragréage manuel ou mécanisé avec du béton ou un mortier technique de réparation adapté ou par projection de béton ;
- La mise en œuvre d'un revêtement de protection ou à caractère esthétique sur les surfaces traitées. Les produits utilisés pour la réparation des bétons dégradés sont classés en 3 catégories :
- produits et systèmes à base de liants hydrauliques classiques ou modifiés par ajout de polymères ;
- produits et systèmes à base de résines synthétiques.
- produits et systèmes mixtes dont le liant actif est constitué à la fois de liant hydraulique et de résines synthétiques. Ils doivent être compatibles avec le béton de la structure et adaptés aux conditions d'environnement.

II.4.2 Le béton projeté

Le béton projeté est une solution incontournable pour le confortement des terrains, lors de la réalisation de tunnels notamment, grâce à la possibilité de bétonner en s'affranchissant des opérations de coffrage. Le béton projeté est également une solution idéale pour la réparation ou le renforcement d'ouvrages compte tenu de son adhérence au support. Le béton projeté ne se limite pas à ces deux utilisations. Focus sur une technique performante en constant développement.

II.4.2.1 Définition

Le béton projeté est un béton formulé à partir de ses constituants habituels, transporté dans un tuyau, accéléré par un jet d'air comprimé et mis en œuvre par projection sur un support auquel il adhère. L'énergie cinétique conférée par l'air comprimé compacte le mélange qui devient ainsi dense et homogène. Dans certains cas, cette force de compaction est complétée par l'impact des gravillons les plus gros qui viennent percuter le matelas de béton déjà mis en

œuvre et accentuent le compactage du béton projeté. Le mélange à projeter est composé de ciment, de sable, de graviers ou de gravillons et éventuellement d'eau, d'adjuvant (selon la technique de projection) et de fibres. Cette technique de mise en œuvre s'affranchit donc des sujétions de coffrage, ce qui prédispose le béton projeté pour des utilisations spécifiques comme le soutènement de tunnels, le confortement de talus ou la réparation d'ouvrages en béton ou en maçonnerie.

II.4.2.2 Deux techniques de projection

La voie sèche (VS) et la voie mouillée (VM) Il existe deux techniques de projection qui se différencient, entre autres, par le lieu d'introduction de l'air comprimé et de l'eau, ce qui induit des comportements très différents selon la technique. On distingue :

- La projection par voie sèche, avec ou sans remouillage ou pré humidification ;
- La projection par voie mouillée, qui elle-même se divise en deux méthodes :

A projection par voie mouillée à flux dense,

La projection par voie mouillée à flux dilué, cette méthode est rarement utilisée de nos jours. Dans le cas de la projection par voie sèche, le mélange sec ou légèrement humide et de consistance pulvérulente est introduit dans la machine de malaxage. Le transfert du mélange de la machine jusqu'à la lance est assuré par un flux d'air comprimé (transfert à grande vitesse). L'eau est ajoutée à la lance. Dans le cas de la projection par voie mouillée, le mélange, de consistance plastique, contient déjà toute l'eau nécessaire. Le transfert est mécanique : le béton est pompé, éventuellement additionné d'air comprimé pour en faciliter le transit (on parle alors de flux dilué). La projection est assurée par ajout d'air comprimé à la lance. La consistance des deux mélanges n'est donc pas comparable. Elle induit des différences en termes de comportement lors de la projection, de compactage du béton, de production de pertes et de poussière, et de rendement.

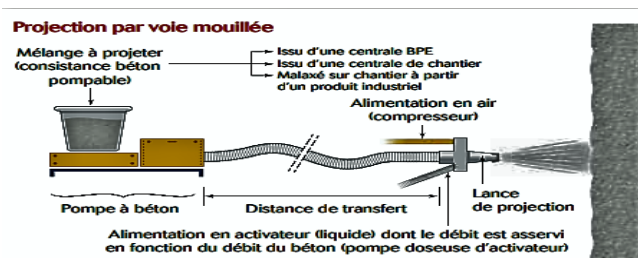


Figure II. 1: projection par voie mouillée.



Figure II. 2: Réparation en béton projeté.

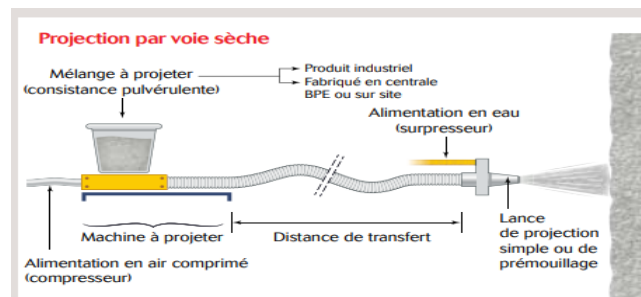


Figure II. 3: projection par voie sèche.

➤ Principaux domaines d'utilisation

Les qualités des bétons projetés prédisposent l'emploi de l'une ou l'autre technique à :

- Travaux de réparation et de renforcement (forte résistance, grande adhérence et retrait réduit).
- Rejointoiement des murs en maçonnerie à joint large (faible débit et grande adhérence).
- Projection sur falaise et talus (forte résistance et grande adhérence).
- Béton réfractaire (forte résistance et grande adhérence).

II.4.3 Le chemisage en béton armé

L'habillage de poteau, ou (jacketing en anglais), est une intervention de renforcement structurel qui consiste à appliquer une couche supplémentaire de matériau autour des poteaux existants pour en augmenter la résistance ou améliorer leurs performances. Cela peut être nécessaire pour différentes raisons, notamment l'augmentation de la charge que le pilier doit supporter pour s'adapter à de nouveaux besoins d'utilisation, la correction de défauts structurels ou pour améliorer la résistance sismique du bâtiment.

Les matériaux utilisés pour l'habillage peuvent varier en fonction des besoins spécifiques du projet, mais peuvent inclure du béton, de l'acier, des fibres composites renforcées de polymères (FRP), ou une combinaison de ces matériaux. L'objectif principal est de fournir un renforcement améliorant les caractéristiques structurales du poteau sans compromettre sa stabilité ou sa fonctionnalité.

C'est une intervention modérément invasive, assez rapide à réaliser, relativement peu coûteuse et permet d'obtenir des améliorations radicales en termes de sécurité. En particulier, cela permet d'augmenter :

- la capacité de charge, selon le phénomène dit de «confinement» du béton. La présence du nouveau béton (de caractéristiques supérieures à celui existant) et de l'acier garantit une pression latérale s'opposant à la dilatation en réponse aux charges axiales ;
- la résistance à la flexion et à la coupe, des interventions «sélectives» peuvent également être réalisées. Si le renforcement vise uniquement à augmenter la résistance à la flexion, les barres longitudinales en acier devraient également être ancrées dans les éléments structurels adjacents, en ajoutant également des armatures de connexion transversale entre la chemise elle-même et les poutres existantes. Au contraire, pour augmenter uniquement la résistance à la coupe, l'habillage ne devrait pas être ancré, laissant un joint avec la dalle d'environ 1 cm (pour le béton et pour l'armature) ;
- la capacité de déformation, c'est-à-dire la capacité de répondre aux sollicitations par déformation non structurelle (essentielle pour absorber l'énergie).

L'habillage de poteaux est une technique traditionnelle et éprouvée, ayant démontré toute son efficacité au fil des décennies.

Il trouve application dans une large gamme de scénarios, de la restauration de bâtiments historiques à la correction de défauts structurels, de la réponse à des charges supplémentaires à la réduction des risques sismiques. Dans des contextes où la démolition et la reconstruction sont impraticables, peu rentables ou non durables, l'habillage offre une solution efficace pour améliorer les performances structurelles sans compromettre l'intégrité du bâtiment.

Les matériaux utilisés pour l'habillage de poteau dépendent des besoins spécifiques du projet et des conditions de la structure existante. Le béton armé représente un choix courant pour sa polyvalence et sa résistance, tandis que l'acier et les matériaux composites renforcés de fibres offrent des solutions alternatives en termes de légèreté et de facilité d'installation. Les méthodes d'application varient du coulage traditionnel à la préfabrication, permettant une personnalisation en fonction des besoins structurels et de conception.

Le seul véritable défaut de l'habillage en béton armé réside dans l'augmentation des «masses», c'est-à-dire de la largeur des poteaux eux-mêmes, ce qui pourrait réduire la surface de plancher. Cependant, cet inconvénient pourrait être surmonté en optant pour des habillages réalisés avec des fibres renforcées, une intervention moins courante que l'habillage en béton et en étriers

Métalliques, mais tout aussi efficace, notamment pour améliorer la résistance à la traction, sans ajouter de charges ou de masses supplémentaires à la structure existante.



Figure II. 4: Chemisage en béton armé.

II.4.4 Traitement des fissures

Il existe cinq principales techniques de traitement des fissures. Le choix de la technique adaptée dépend des caractéristiques de la fissuration :

- ouverture (microfissures, fissures fines, fissures moyennes...).
- profondeur.
- activité (fissures ouvertes, fermées, mortes, actives...).
- tracé, géométrie.
- exposition aux intempéries (fissures sèches, humides, saturées, ruisselantes...).
- présence d'eau libre ou sous pression.
- état et type de support.
- délai imposé pour la remise en service de l'ouvrage.

➤ Injection

Elle consiste à faire pénétrer dans la fissure un produit qui va créer une continuité mécanique et/ou une étanchéité entre les parties disjointes.

- Elle s'applique à des fissures dont l'ouverture est comprise entre 0.1 et 0.2 mm.
- L'injection par un produit souple permet son adaptation aux mouvements générés par les variations thermiques et hygrothermiques.
- L'injection par un produit rigide permet d'assurer la continuité de la matière



Figure II. 5: Traitement des fissures techniques d'injection

➤ **Cachetage**

Il a pour but d'obturer provisoirement une fissure pendant l'injection afin de contenir le liquide injecté dans la fissure jusqu'à sa prise.

➤ **Calfeutrement**

Il a pour objectif de colmater définitivement et en profondeur une fissure au moyen d'un produit souple :

- Mastic ou mortier déposé dans une engravure créée le long de la fissure.
- Permet de rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau.
- Empêche la pénétration de matières solides, sans bloquer les mouvements de la fissure.

➤ **Pontage**

Il est destiné à recouvrir une fissure au moyen d'un produit souple adhérent à la surface du support :

- Revêtement, feuille préfabriquée...
- Rétablit une étanchéité à l'air ou à l'eau.
- Empêche la pénétration de matières solides tout en laissant libres les mouvements de la fissure.

➤ **Protection généralisée**

Ce traitement consiste à mettre en œuvre, sur toute la surface de la structure fissurée, un revêtement qui ferme les fissures. Il est applicable lorsque la fissuration est anarchique et concerne l'ensemble du support.

Choix des produits en fonction des fissures

Le choix des produits dépend de :

- L'ouverture des fissures.
- La présence éventuelle d'eau.
- L'activité des fissures.

➤ Les produits utilisés incluent

- Produits à base de liants hydrauliques (avec ajouts ou modifiés par des polymères organiques).
- Mastics à base de liants de synthèse (silicone, polyuréthane...).
- Coulis (à base de silicate, de polyuréthane...).
- Feuilles auto-adhésives ou collées.
- Résines (époxydes, polyuréthanes...).
- Gels (silice, solution aqueuse...).
- Joints préformés.

Les techniques de traitement de fissures comportent une étape primordiale qui est la préparation et le nettoyage du support et des fissures :

Brossage, décapage thermique, aspiration, lavage à l'eau sous pression, l'air comprimé... afin d'éliminer toute trace de laitance, de poussières, d'émousses qui pourrait perturber l'efficacité de l'injection.

Différentes normes précisent les caractéristiques (mécaniques, comportement à la température, aux agents agressifs...) que doivent respecter les produits en fonction de chaque technique d'injection.

II.4.5 Réparation des différents éléments structurels :

Parfois, certains éléments structurels (colonnes, dalles, poutres, fondations) subissent des dommages importants qui nécessitent leur réhabilitation et leur renforcement. Cela permet de garantir qu'ils puissent supporter en toute sécurité les efforts auxquels ils sont soumis. Dans certains cas, notamment pour les colonnes, un renforcement est nécessaire pour permettre l'ajout d'étages supplémentaires (Ibrahim Waked, 2003).

II.4.5.1 Les dalles en béton

Parfois, en raison de l'augmentation des charges sur les dalles ou d'un manque de sécurité dans la conception initiale des dalles en béton, ou encore à cause de la corrosion des armatures et du fendillement du béton, il est nécessaire d'adopter l'une des solutions suivantes.

Solutions

➤ Ajout d'un renforcement supérieur

- Cette solution est appliquée en cas d'insuffisance de la résistance aux moments négatifs et d'un ferrailage inférieur insuffisant.
- Une grille d'armatures est ajoutée et fixée à l'aide d'étriers.

➤ Ajout d'une nouvelle couche de béton (Overlay Concrete)

- Cette solution consiste à ajouter une nouvelle couche de béton sur la dalle existante.
- Elle est utilisée lorsque le moment fléchissant positif est insuffisant ou lorsque la charge permanente augmente en raison de l'ajout de cette nouvelle couche.

Les charges vivantes supportées par la dalle sont bien inférieures aux charges appliquées.

II.4.5.2 Étapes de mise en œuvre des solutions susmentionnées

- Enlever le revêtement en béton et nettoyer l'armature de la rouille à l'aide d'une brosse métallique, puis appliquer un revêtement anticorrosion sur la surface de l'acier.
- En cas de corrosion importante de l'armature ou de nécessité de renforcement des dalles, un treillis d'armature supplémentaire en acier est ajouté et fixé à l'aide d'étriers, conformément aux règles de conception connues.
- Fixer le nouveau treillis inférieur en acier en l'ancrant aux poutres environnantes à l'aide d'étriers.
- Appliquer une couche de résine époxy adhésive sur le béton existant avant d'ajouter le nouveau béton.
- Projeter une couche de béton au mortier époxy avant que l'adhésif ne sèche complètement.
- Refaire le revêtement en béton ou augmenter l'épaisseur de la dalle, si nécessaire, en utilisant du béton projeté ou appliqué en plusieurs couches successives

II.4.6 Amélioration des éléments structuraux à l'aide de chemises en acier

Le renforcement des poteaux de sections circulaires ou rectangulaires avec des chemises en acier permet d'améliorer considérablement la résistance sismique des poteaux. L'efficacité des chemises en acier a été clairement démontrée, à la fois par les recherches expérimentales et par des observations sur le terrain effectuées durant le séisme de Northridge en 1994. Plusieurs ponts dont les piles étaient renforcées avec des chemises en acier se trouvaient dans des régions ayant subi des secousses intenses qui ont atteint une accélération maximale de 0,25 g. Aucun de ces piles ne semble avoir subi de dommages importants.

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

Les chemises en acier rectangulaires destinées au renforcement des poteaux rectangulaires améliorent aussi la résistance et la ductilité des poteaux. Toutefois, les résultats des recherches ont démontré que les chemises rectangulaires sont moins efficaces que les chemises elliptiques. Peu de recherches ont été effectuées sur le renforcement des assemblages poteau-poutre des bâtiments plus anciens. Le renforcement au moyen de chemises en acier ondulées semble être un moyen efficace de renforcer les assemblages poteau-poutre. Toutefois, cette technique a été développée dans un but particulier, c'est à dire pour des assemblages poteau-poutre sans dalles de plancher. Les systèmes de dalles employés dans les structures de bâtiments ordinaires rendraient difficiles les opérations de renforcement des assemblages poteau-poutre.

II.4.6.1 Technique d'amélioration

Les chemises en acier sont largement utilisées pour accroître la résistance des poteaux aux séismes ou pour les réparer. Les caractéristiques des différentes chemises en acier (telles que la géométrie des chemises et les propriétés du coulis) peuvent varier, bien que la procédure et le fondement de la plupart des systèmes de gainage d'acier soient plus ou moins similaires. Un poteau circulaire déficient est enveloppé de couches (ou chemises) d'acier préfabriquées soudées ou jointes mécaniquement. Le mince espace entre la chemise et le poteau, généralement inférieur à 10 mm, est rempli de coulis de ciment afin d'assurer la continuité entre la chemise et le poteau. La nouvelle section de poteau, qui se compose de la section de poteau existante et de la nouvelle couche d'acier externe, est aussi plus solide (possède une résistance à la charge plus élevée) et plus rigide (attire des charges plus élevées, ce qui n'est pas souhaitable) que le poteau original. Pour les poteaux circulaires, les chemises prennent la forme de deux demi-couches légèrement surdimensionnées pour faciliter leur installation, soudées sur place aux jointures verticales. Pour les poteaux rectangulaires, la chemise est habituellement roulée en forme elliptique et les espaces les plus larges entre le tubage et le poteau sont remplis de béton plutôt que de coulis de ciment (Figure II.6). La forme elliptique est nécessaire pour appliquer une pression de confinement par retenue passive dans les régions de rotules plastiques. Afin d'empêcher la chemise de s'appuyer sur la semelle lors de la compression, un espace vertical d'environ 25 mm est généralement prévu entre la chemise et la semelle. (Figure II. 7) montre un poteau rectangulaire renforcé avec une chemise en acier elliptique à la base de la barre de recouvrement appropriée.

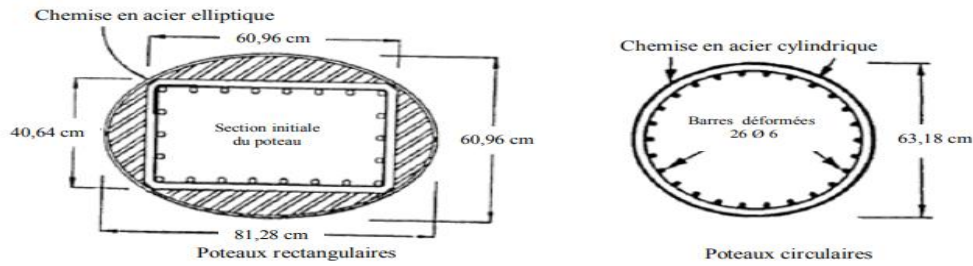


Figure II. 6: Renforcement de poteaux circulaires et rectangulaires avec des chemises en acier.

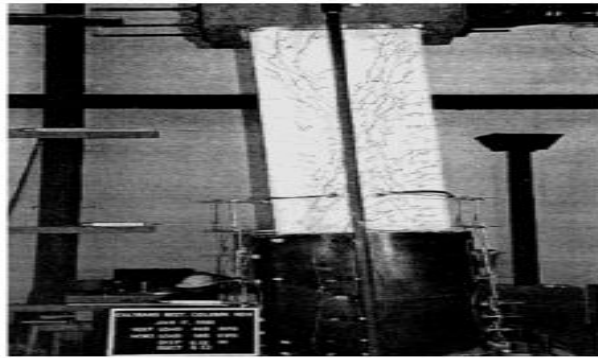


Figure II. 7 : Barre de recouvrement d'une base de poteau rectangulaire renforcé avec une chemise en acier.

II.4.6.2 Avantages et inconvénients du chemisage en acier

➤ Avantages

- Courte durée de réalisation par rapport au chemisage en béton.
- Bonne performances des éléments renforcés (bonne ductilité).
- Faible augmentation des sections.

➤ Inconvénients

- Coûts relativement élevé.
- Nécessité de soudure donc une main-d'œuvre qualifiée.
- Problème de corrosion ce qui nécessite un entretien régulier.
- Poids des chemises et difficulté de découpage.
- Augmentation de la rigidité en flexion ce qui n'est pas souhaité dans le cadre du renforcement parasismique (augmentation de l'énergie restituée élastiquement), sauf cas particuliers (corrosion ou manque initial des armatures longitudinales).

II.4.7 Réparation et renforcement des structures par des armatures Passives additionnelles

Les techniques de réparation et de renforcement de structures par des armatures passives additionnelles concernent la mise en œuvre :

- d'armatures de béton armé (treillis ou cages d'armatures en acier au carbone ou en inox) ou en matériaux composites au sein de l'ouvrage après enlèvement local du béton par réalisation d'une saignée qui est ensuite rebouchée ;
- d'armatures de béton armé en métal ou en matériaux composites en surface du béton autour de la partie d'ouvrage existante et liées à celle-ci puis enrobées par un ajout de béton coulé projeté ou contrecollé ;
- de plaques (bandes, lamelles) ou de tissus en matériaux composites collés à la surface du béton
- de tôles et plats collés de faibles épaisseurs (3 à 5 mm) découpées en bande de faible largeur (300 à 500 mm) et collées sur le béton par une résine époxydique (technique quasiment plus utilisée) .

La réparation d'armatures passives intérieures au béton consiste à enlever le béton endommagé ou pollué et à dégager les armatures longitudinales ou transversales corrodées.

Après préparation du support (nettoyage, aspiration soufflage, repiquage du béton, élimination des poussières et morceaux de béton et ragréage éventuel) et des armatures (Décapage complet des armatures corrodées, par brossage métallique, repiquage, sablage, grenailage ou à l'eau sous pression, le dégagement des armatures doit se faire sur une longueur suffisante pour assurer le recouvrement des barres), les nouvelles armatures sont mises en place en respectant les dispositions constructives habituelles. Le raccordement des armatures est assuré par recouvrement, par soudure ou raboutage.

Les caractéristiques du mortier ou du béton de ré-enrobage des armatures remplacées doivent être compatibles avec celles du béton existant et l'agressivité de l'environnement de l'ouvrage. Le mortier ou le béton mis en place permet de reconstituer la géométrie initiale de la partie d'ouvrage concernée et enrober les nouvelles armatures.

Il est mis en œuvre manuellement ou mécaniquement dans des coffrages ou projetés, selon le volume et la géométrie de la cavité à combler.

Après durcissement du mortier ou du béton, la mise en place d'un produit ou d'un système de protection est souvent nécessaire pour améliorer la durabilité de la réparation.

II.4.8 Renforcement des structures par précontrainte additionnelle

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés graissés généralement disposés à l'extérieur du béton.

La précontrainte additionnelle va introduire dans la structure des sollicitations complémentaires, qui vont compenser les défauts de dimensionnement ou de conception ou

Des efforts supplémentaires, que doit supporter la structure suite à des modifications des conditions de chargement ou d'utilisation.

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

Cette technique permet :

- soit d'améliorer la pérennité des ouvrages.
- soit de renforcer des ouvrages en béton (en particulier des ouvrages en béton précontraint dont les câbles présentent des problèmes de corrosion ou de ruptures de torons ou d'ancrages ou qui ont fait l'objet lors de leur dimensionnement de prise en compte de lois de fluage mal adaptées).
- Soit d'augmenter la capacité structurale des ouvrages (augmentation des charges ou des trafics, modification des fonctionnalités, passage de tramway soude convois exceptionnels). Elle peut s'appliquer à tous types de structures existantes en béton armé ou en béton précontraint.

La précontrainte extérieure est le plus souvent constituée de câbles fixés à des bossages ancrés à la structure par des barres de précontrainte.

Les câbles sont protégés par une gaine en polyéthylène injectée à la cire pétrolière.

La technique des torons graissés est beaucoup plus simple d'utilisation car elle permet la mise en tension toron par toron à l'aide de petits vérins.

II.4.9 Tôles collées

II.4.9.1 Rappels historiques

Les adhésifs furent utilisés très tôt dans l'histoire de la construction, mais ce n'est que dans la première moitié du vingtième siècle qu'ils connurent une utilisation importante avec le développement de deux activités : la construction aéronautique et la chimie de synthèse. Avec l'apparition, après la seconde guerre mondiale, de composants adhésifs susceptibles de polymériser à froid, leur utilisation s'est développée dans le domaine de la construction puis de génie civil. Les premières utilisations, du fait de la faible résistance des composées, étaient surtout centrées sur le collage de certains matériaux de second œuvre tels que le carrelage par exemple. Plus tard, avec l'apparition de composants offrant des pouvoirs adhérents importants et de très bonnes résistances mécaniques, l'utilisation des adhésifs s'est développée dans le domaine du génie civil pour le renforcement et la réparation des structures en particulier

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

mécaniques se posent lors de l'utilisation de tôles extérieures collées au béton pour le renforcement des structures

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

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

La mise en place des tôles nécessite une très bonne préparation de chantier ainsi qu'une excellente coordination des équipes. Le collage impose un dispositif de serrage pouvant être un étaielement, un serrage par serre-joint ou un serrage par vérins plats.

L'emploi de ce mode de réparation est particulièrement limité à cause de sa mise en œuvre difficile et onéreuse. Ce procédé consiste en un apport d'armatures extérieures soit pour consolider un élément dont les dégradations mettent en péril la résistance, soit pour remplacer des aciers oubliés, ou mal positionnés.

La préparation des surfaces, la mise en œuvre des colles, la réalisation du placage, etc., doivent impérativement être confiées à des entreprises spécialisées ou à des laboratoires du fait de la difficulté de la mise en œuvre de cette technique, certains procédés font d'ailleurs l'objet de brevets (ex. : brevet UTI-L'HERMITE, inventeur de la technique) (figure II.8).

Dans les locaux devant, du fait de leur destination, présenter une certaine résistance au feu, l'étude mécanique des renforcements doit être complétée par celle de l'isolation thermique permettant de soustraire la colle aux effets des incendies dans les conditions requises. La colle utilisée est, généralement, une résine époxyde. Son épaisseur est de 0,5 à 1 mm. Les tôles d'acier, de qualité courante, ont une épaisseur limitée à 3 mm toutefois, le collage de tôles métalliques présente aussi quelques difficultés :

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



Figure II.8 : Renforcement d'un viaduc par tôles collées.

II.4.9.2 Avantages et inconvénients des tôles collées

➤ **Avantage**

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

➤ **Inconvénients**

- Sensibilité de l'acier à l'oxydation (il demande donc une protection et un entretien soigné).
- Impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles, même sous faible épaisseur (solicitation le long d'une face).
- Nécessité d'une préparation spécifique de la surface à traiter (la raideur des tôles nécessite une surface parfaitement plane pour assurer l'uniformité de l'épaisseur de l'adhésif).
- Nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine de collage
- Impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masse manipulées trop importantes), ce qui limite d'autant les possibilités de réparation.

II.4.10 Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de Matériaux composites

Les techniques de renforcement des structures au moyen de matériaux composites utilisent le collage de plats ou de plaques composites (textiles de renforcement unidirectionnels ou bidirectionnels, lamelles, fibres de carbone...) ou la stratification directe in situ de composites (tissus textiles en verre ou carbone) associés à des matrices polymères thermodurcissables (résines époxydes, polyester...).

Cette technique de renfort passif est une alternative innovante à la solution traditionnelle utilisant des plats métalliques extérieurs collés. Elle permet :

- d'augmenter la résistance de structures dégradées, endommagées ou faisant l'objet de défauts de conception ou d'exécution afin de prolonger leur durée d'utilisation ;
- d'adapter la structure à des modifications de ses conditions d'exploitation ou d'accroître sa capacité portante.

Ces techniques permettent :

- L'accroissement de la résistance à l'effort tranchant ou vis-à-vis de la Flexion de poutres ;
- le renforcement de structures en cas de modification des charges d'exploitation, de changement de système statique, d'insuffisance d'armatures ou de capacité portante

Ou de défaut d'exécution ;

- le renforcement parasismique de structures pour les adapter aux évolutions normatives
- l'augmentation de la résistance et de la rigidité de structures en béton ;
- le confinement de poteaux, de colonnes ou de piles ;
- le renforcement de structures lors de la création d'ouvertures ou de trémies.

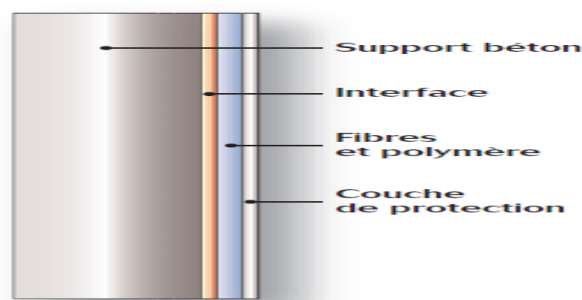


Figure II. 9 : Schéma d'un composite.

II. 5 Conclusion

Les phénomènes de dégradation du béton sont complexes et variés, ce qui nécessite une connaissance approfondie pour en faciliter la détection et prendre les mesures appropriées. Un diagnostic précis constitue une étape essentielle pour déterminer la nature des travaux à entreprendre et sélectionner les matériaux adéquats pour la réparation. D'un point de vue économique, l'entretien périodique et le suivi régulier s'avèrent plus rentables que d'attendre une dégradation avancée, car les interventions tardives sont souvent plus coûteuses et complexes.

Cependant, les méthodes traditionnelles ont montré leurs limites à long terme, en raison de problèmes tels que la corrosion des plaques d'acier et la faible durabilité du béton projeté. Cette réalité a conduit à la recherche de solutions plus performantes et durables. Dans ce contexte, le renforcement des structures à l'aide de matériaux composites, notamment les polymères renforcés de fibres de carbone, s'est imposé comme une alternative ingénieuse et efficace. En

plus d'offrir des solutions avancées pour la réhabilitation, cette approche permet d'améliorer les performances structurelles et d'assurer une meilleure durabilité des ouvrages en béton armé.

Chapitre III

*Généralité sur Les matériaux
composites*

III.1 Introduction

Parmi les matériaux de construction utilisés actuellement, les composites occupent une part de plus en plus importante grâce à leurs propriétés avantageuses telles que la légèreté, la rigidité et la résistance spécifiques, la résistance à la fatigue et à la corrosion ainsi que la multitude des possibilités d'intégration dans tous les types de constructions et d'ouvrages. Les matériaux composites du génie civil se distinguent des autres matériaux composites destinés à l'industrie et le transport, par la variété des types de matrices (cimentières, céramiques, polymériques.) et de fibres (synthétiques, métalliques, naturelles...), ainsi que par les différents types d'ajouts (particules minérales, poudres synthétiques ou agents chimiques), faisant que les combinaisons ou mélanges possibles sont très nombreux. Avec le nombre grandissant des produits composites de construction, il devient de plus en plus difficile de comparer leurs propriétés et performances par rapport aux besoins en construction ou en réhabilitation, qui doivent répondre à plusieurs critères et exigences structurelles, thermiques, économiques et environnementales. Une classification focalisée sur les composites pour le génie civil, incluant l'ensemble des critères spécifiques à ce secteur, sera ainsi d'une réelle utilité pour évaluer leurs propriétés et comparer leurs performances par rapport aux matériaux de construction conventionnels et avec les autres catégories de matériaux composites. Cette classification permettra donc d'identifier les produits composites les plus adaptées pour chaque catégorie (Meliani, 2015).

➤ Définition

Un matériau composite est un mélange de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes et ayant des propriétés complémentaires. Le matériau final est alors hétérogène et possède des qualités supérieures celles de chacun de ses constituants.

Généralement, un matériau composite est constitué d'une ou plusieurs phases discontinues incluses dans une phase continue. La phase discontinue, souvent plus rigide et plus résistante, est appelée renfort, alors que la phase continue prend le nom de matrice (figure III.1). Cette dernière, habituellement moins rigide, sert principalement à transmettre les efforts au renfort, à le protéger contre tout impact ou toute dégradation extérieure et à donner la forme souhaitée au composite. Parfois, il y a besoin de rajouter une phase supplémentaire : les charges et les additifs. Ils ont pour rôle d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques du composite final ou de rendre sa mise en œuvre moins difficile.

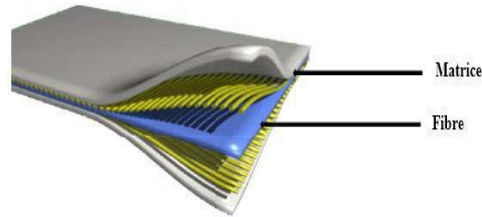


Figure III. 1 : Structure d'un matériau composite.

III.2 Matrices

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent être atteintes. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure III.02.

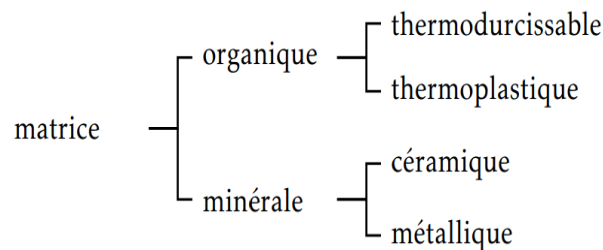


Figure III. 2 : Types de matrice.

III.2.1 Les matrices organiques

Un très grand nombre de matériaux plastiques peut être utilisé comme matrice dans les matériaux composites. Elles peuvent aussi bien appartenir à la famille des résines « Thermodurcissables » qu'à celles des résines « thermoplastiques ».

III.2.1.1 Résine thermodurcissable

Polymère transformée en un produit essentiellement infusible et insoluble après traitement thermique (chaleur, radiation) ou physicochimique (catalyse, durcisseur). La transformation est irréversible.

III.2.1.2 Résine thermoplastique

Polymère pouvant être alternativement ramollie par chauffage et durci par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité. La transformation est réversible.

III.2.1.3 Résines polyesters

Les résines polyesters sont des liquides de faible viscosité à base de polyesters insaturés. Elles sont obtenues par réaction d'un acide carboxylique (ou l'un de ses dérivés) avec un acide donnant l'ester.

La première résine polyester insaturée a été produite par Ellis et Rust en 1940 (Seymour R.B. 1987). Les résines polyesters sont largement utilisées pour fabriquer des profilés putrides en PRF pour des applications aux structures de génie civil et également pour produire des renforts béton. Les trois principales résines polyesters sont les résines orthophthaliqes, isophthaliqes et isophthaliqes néopenty le glycole (iso-NPG). Ces trois types de résine forment la base de la plupart des résines. La différence majeure entre ces trois groupes vient de leur élongation à la rupture, dureté, propriétés d'impact et température de distorsion à la chaleur.

III.2.2 Les matrices métalliques

L'utilisation de matériaux composites à des températures supérieures à 3000°C interdit pratiquement l'usage des matrices organiques et suppose donc que l'élément de renforcement soit noyé au sein d'une matrice métallique. Les plus employées sont les métaux légers et leurs alliages en particulier l'aluminium, le titane et le nickel.

III.3 L'adhésif

Pour le renforcement, un adhésif est utilisé pour coller le composite sur le support béton. Il permet de transmettre les contraintes de cisaillement entre le composite et le béton. Le choix de cet adhésif doit être réalisé en fonction des besoins. Les propriétés mécaniques de la colle peuvent également changer avec une variation de température. L'adhésif possède un module relativement bas, qui diminue en augmentant la température. Le tableau (II.5) donne les propriétés typiques et les caractéristiques d'un adhésif époxy (Rabahi, 2016).

III.4 Polymères renforcés de fibres «FRP»

Les matériaux composites en polymères renforcés de fibres «FRP» sont des produits de synthèse constitués principalement de renforts fibreux, supportés par un liant appelé matrice. Leur comportement dépend principalement du pourcentage de fibres et des propriétés mécaniques des constituants. Ce sont les renforts fibreux qui donnent aux composites leurs propriétés hautement directionnelles, leur imposant un comportement anisotrope et essentiellement linéaire élastique jusqu'à la rupture.

III.4.1 Les constituants d'un polymère renforcé de fibres

Les composites sont des matériaux synthétiques fabriqués avec des mélanges intimes de matériaux de différent état, composition, et forme. Leurs composants sont toujours clairement différenciés et gardent leur identité séparée. Cependant, ils travaillent de manière solidaire dans

le composite, en réunissant des caractéristiques qui ne sont pas atteintes séparément (Vizuet, 2000).

III.4.2 Les renforts (les fibres)

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus). La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure III.03.

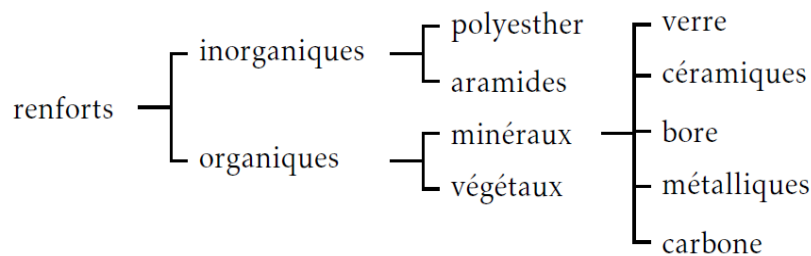


Figure III. 3 : Types de renfort.

III.4.3 Les types de fibres

➤ Carbone

Les fibres de carbone ont un haut module d'élasticité, de 200 à 800 GPa. L'allongement ultime est de 0,3 à 2,5 %. Les fibres de carbone n'absorbent pas l'eau et elles résistent à plusieurs solutions chimiques. Elles présentent une résistance excellente à la fatigue, et une faible relaxation comparée à celle des aciers extensibles précontraints. La fibre de carbone est un conducteur électrique et, par conséquent, peut donner la corrosion galvanique si elle est en contact direct avec l'acier. Il faut signaler également le mauvais comportement au choc et l'abrasion des stratifiés renforcés par des fibres de carbone. Les fibres de carbone se différencient par le taux de carbone plus ou moins élevé qui modifie les allongements et les contraintes à la rupture et les modules d'élasticité. On trouvera des fibres dites « à haute résistance » HR et des fibres « à haut module » HM ou même « à très haut module » THM, et des fibres intermédiaires (Chatain, 2001).

➤ Verre

Les fibres de verre sont moins chères que les fibres de carbone et les fibres d'aramide. Par conséquent, les composites en fibres de verre sont devenus la solution la plus utilisée dans plusieurs applications, tel que le génie civil, l'industrie des bateaux et d'automobiles. Les

modules d'élasticité des fibres sont de 70 à 85 GPa avec un allongement ultime de 2 à 5 % selon la qualité. Par contre les fibres de verre peuvent avoir des problèmes de relaxation. Elles sont aussi sensibles à l'humidité, mais avec le choix correct de matrice les fibres sont protégées.

Les différents types de fibres de verre, classés selon leurs applications spécifiques, sont :

- Verre-E (Electrical) possédant d'excellentes propriétés d'isolation électrique (le moins cher).
- Verre-S (Strength) ayant de très hautes résistances et rigidité à la traction (le plus cher).
- Verre-C (Chimical) stable chimiquement dans les environnements acides.
- Verre-AR (Alkali-Resistant) utilisé pour prévenir la corrosion par l'attaque alcaline dans des matrices cimentaires (fabriqué en ajoutant de zirconium).

La résistance à la traction des fibres de verre se réduit aux températures élevées, mais peut être considérée comme constante pour la gamme de températures à laquelle les matrices polymères peuvent être exposées. La résistance à la traction diminue également avec la corrosion chimique et avec le temps sous des charges soutenues (Sayed Ahmad, 2011).

➤ **Aramide**

Aramide est un terme générique pour un groupe de fibres organiques de faible densité et résistances spécifiques (rapport résistance en traction / densité) parmi les plus élevées parmi les fibres de renfort courantes. Les fibres d'aramide sont caractérisées par une haute résistance, une rigidité élevée et une stabilité vis-à-vis des hautes températures. Les fibres d'aramide ont un coefficient d'expansion thermique négatif suivant la direction longitudinale et positive suivant la direction radiale. Température d'utilisation typique pour les fibres d'aramide varie entre -200°C et +200°C.

Trois types de fibres d'aramide sont commercialement disponibles portant les marques de fabricants telles que :

- Kevlar (Dupont, USA).
- Twaron (Akzo, Pays-Bas).
- Technora (Teijin, Japon).

Des fibres d'aramide SVM sont également produites en Russie. Les fibres de Kevlar sont produites par extrusion de la solution liquide cristalline du polymère avec les molécules partiellement orientées. Il existe plusieurs types de fibres Kevlar : Kevlar 29 (utilisé dans les composites), le Kevlar 49 (utilisé dans les plastiques renforcés) et de Kevlar 149 (présentant le module de traction le plus élevé parmi toutes les fibres d'aramide disponibles). La résistance à la compression des fibres de Kevlar est inférieure de 20% à la résistance à la traction. Le Kevlar 49 a un comportement fragile en traction ductile sous charge en compression et, peut absorber

de l'énergie. Les fibres Kevlar ont une très bonne résistance à la fatigue en traction, affichant un faible fluage et elles peuvent résister à des températures relativement élevées. La résistance et le module des fibres Kevlar diminuent de façon linéaire lorsque la température augmente, mais, conservent plus de 80% de leur résistance initiale à 180 °C. Les fibres de Kevlar absorbent de l'eau, la quantité d'eau absorbée dépendant du type de la fibre. Elles sont sensibles aux rayons ultraviolets (UV). À haute teneur en humidité, les fibres de Kevlar ont tendance à se fissurer (fissuration générée par les micro-vides préexistants) et à produire une fissure longitudinale. Ces fibres sont résistantes à de nombreux produits chimiques, mais elles peuvent être dégradées par certains acides et alcalins (Sayed Ahmad, F, 2011).

➤ céramiques

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2 000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions. Quelques exemples de fibres céramiques :

- fibres de Carbure de Silicium
- fibres de Bore
- fibres de Bore carbure de silicium

III.4.4 Caractéristiques mécaniques des fibres

Il existe différents types de fibres. Elles peuvent être scindées en deux groupes, les fibres à haut module et les fibres à haute résistance. Les fibres à haut module ont une résistance faible et celles à forte résistance ont un module faible

Tableau III. 1: Caractéristiques mécaniques des fibres.

Matériau de renforcement	Densité (Kg/m ³)	Contrainte de traction maximale (σ_t) (MPa)	Contrainte de compression maximale (σ_c) (MPa)	Module d'élasticité E (GPa)
AS4	1800	-	3599	235
T300	1700	1.2	3654	231
IM6	-	0.88	1460	-
IM8	1800	-	5171	310
Kevlar 49	1440	2.5	3620	124
Verre E	2580	3.5	3450	69

III.4.5 Les composites «FRP»

Lorsque les fibres et les matrices sont combinées dans un nouveau matériau, il devient un Composite. Les fibres peuvent être orientées dans une seule direction ce qui donne des composites unidirectionnels, ou dans plusieurs directions afin d'optimiser la performance du composite qui sera ou multidirectionnel. La fabrication des composites peut être faite par plusieurs méthodes différentes : la stratification directe ou au contact, la pultrusion, et l'enroulement filamentaire. En fonction des fibres utilisées, les composites «FRP» sont classées en trois groupes :

- polymère renforcé de fibres de verre (glass-fibre-reinforced polymer) : VFRP
- polymère renforcé de fibres de carbone (carbon-fibre-reinforced polymer) : CFRP
- polymère renforcé de fibres d'aramide (aramid-fibre-reinforced polymer) : AFRP

III.4.6 Propriétés mécaniques des composites «FRP»

Les propriétés mécaniques des matériaux composites varient considérablement. Ces propriétés dépendent des fibres contenues dans le composite (type, quantité et direction), de la matrice utilisée, et du rapport volume-fibre, c'est à dire le ratio du volume des fibres par rapport au volume total du composite. Elles sont aussi affectées par le volume ou la dimension du composite lui-même en général, les composites de fibres de carbone sont plus solides et plus rigides que les composites de fibres de verre. Le Tableau I.2.4 résume les principales propriétés mécaniques des matériaux composites couramment utilisés en génie civil (Benzaid, 2010).

Tableau III. 2: Propriétés mécaniques typiques des composites.

Matériau composite	Contenu en fibres (% par poids)	Densité (kg/m ³)	Module d'élasticité longitudinal (GPa)	Résistance à la traction (MPa)
Fibres de verre / polyester (GFRP laminé)	50-80	1600-2000	20-55	400-1800
Carbone / époxy (CFRP laminé)	65-75	1600-1900	120-250	1200-2250
Aramide / époxy (FRP laminé)	60-70	1050-1250	40-125	1000-1800

Les trois types des composites, nommés «VFRP», «CFRP» et «AFRP» sont utilisés pour le renforcement des structures en béton armé, à la fois dans des applications pratiques ou de recherches.

III.4.7 Mise en œuvre du renfort

La première étape consiste à préparer le support. Il doit être propre, sans trace de poussière et dégraisse. Afin d'augmenter l'adhérence du renfort, un traitement mécanique de la surface doit être effectuée. Les méthodes les plus utilisées sont le décapage par projection d'abrasif ou sablage, le ponçage ou le lavage haute pression. Les objectifs de cette étape sont de supprimer la couche de faible cohésion du substrat, d'augmenter sa rugosité et d'améliorer sa mouillabilité. Dans le cas d'une réparation, un curage des fissures ainsi que leur rebouchage et/ou une injection à l'aide de résine fluide ou de mortier doit être effectuée. Une fois le support préparé il est imprégné de résine époxy. La méthode d'application doit permettre une bonne pénétration de la résine dans le support. Les bandes de tissus sont découpées en les aux dimensions. Les bandes sont généralement livrées en rouleaux de largeur normalisée et sont uniquement découpées dans le sens de la longueur afin de limiter l'effilochage du tissu. La réalisation de coupe longitudinale entraîne un risque d'affaiblissement du tissu qui rendrait le collage difficile.

Afin de garantir une bonne imprégnation du tissu par la résine il est possible de l'imprégner avant de le mettre en place sur le support. Cette opération peut se faire à la main sur une surface propre et lisse ou à l'aide d'un bac d'imprégnation. Dans le cas où la résine de collage fait aussi office de résine d'imprégnation cette étape peut également être réalisée directement sur le support en faisant pénétrer le surplus de la couche d'imprégnation dans le tissu au moment de la mise en place de la bande. L'application des bandes sur le support s'effectue d'une extrémité vers l'autre par placage en contrôlant la position de la bande par rapport au plan de pose. La bande ne doit présenter ni pli ni étirement excessif. L'étape de marouflage s'effectue à l'aide d'un rouleau dentelé et vise à chasser les bulles d'air bloquées entre le tissu et le support. La deuxième couche de résine aussi appelée couche de fermeture vise à achever l'imprégnation du tissu. Elle doit être appliquée avant polymérisation de la première couche. Dans le cas où plusieurs couches de tissus se superposent (multi couches ou dans les zones de recouvrement) la superposition peut se faire sur une couche de résine humide pendant la polymérisation ou après polymérisation. Le marouflage permet dans ce cas de chasser également les bulles d'air emprisonnées entre les couches de tissu, garantissant une plus grande surface de collage.



Figure III. 4 : Application d'un confinement CFRP sur des piles de ponts.

III.4.8 Processus de fabrication des armatures en matériaux composites FRP

Il y a trois principaux types de processus de fabrication pour les FRP : la pultrusion, le tressage et le filament (enroulement filamentaire). Les barres d'armature en matériaux composites sont produites en général à l'aide du procédé de pultrusion. Le procédé de pultrusion fournit des structures de section constante qui pourraient être de longueur illimitée telles que, les barres, les câbles, les poutres de section en I et L. Ce procédé consiste à lier les fibres, les imprégner à l'aide d'un mélange de résine et les faire passer à travers un moule de préformage. Les températures de mûrissement se situent normalement entre 110°C et 180°C. Lorsque l'armature sort de la filière, elle passe dans une filière dépolymérisation où la résine durcit (figure III.4). Des arrangements spéciaux de fibres ou une combinaison de deux ou plusieurs types de fibres de renfort peuvent être utilisés pour conférer au matériau composite des propriétés mécaniques spécifiques. D'autres procédés de fabrication peuvent être utilisés telle que la méthode de tressage pour produire des torons tressés. Ce processus de tressage implique le tressage des fibres suivi d'une imprégnation de résine et du durcissement. Les traitements de surface du produit brut sont essentiels pour donner une bonne adhérence avec le béton. La manière la plus facile d'augmenter l'adhérence est d'appliquer un revêtement de sable sur la surface du renfort. Le revêtement de sable peut contenir des particules de sable fin ou d'oxyde d'aluminium noyées dans une résine à haute résistance. Une autre possibilité pour augmenter la capacité à l'adhérence peut être le placement d'indentations ou de nervures à la surface. Celles-ci peuvent être réalisées à l'aide des enroulements en spirale de faisceaux de fibres noyées dans résine et collées sous pression ou des nervures en céramique de formes semblables à celle des renforts conventionnels en acier. Les nervures et les enroulements peuvent améliorer l'action mécanique entre le renfort et le béton, ce qui augmente l'adhérence. La liaison adéquate entre les couches de traitements post-installées et les couches internes du renfort de FRP a une grande importance. La rupture par arrachement ou cisaillement de couches externes doit être évitée. Le traitement de surface du renfort par des enroulements ou des nervures peut être aussi combiné avec un revêtement de sable.

III.4.9 Principaux avantages et inconvénients des renforts en FRP dans les applications au béton précontraint

Nous récapitulons dans ce paragraphe les principaux avantages et inconvénients des renforts en PRF dans le cadre de leur utilisation pour la mise en précontrainte du béton

➤ **Avantage**

- Non corrosifs.
- Haute durabilité,
- Basse relaxation,
- Bon comportement à la fatigue,
- Résistance spécifique élevée,
- Neutralité électromagnétique,
- Possibilité d'intégrer des fibres optiques dans les renforts FRP comme un système de surveillance et détection des signaux de dégradation,
- Facilité de mise en œuvre due à la légèreté et à la facilité de découpe.

➤ **Inconvénients**

- Comportement élastique fragile et absence de plasticité,
- Difficulté de mise en tension due à la faible résistance au cisaillement (système d'ancrage),
- Coefficient d'expansion thermique transversal très important (2 à 5 fois celui du béton),
- Coût très élevé.

III.5 Le matériau à gradients de propriétés (FGM)

Le matériau à gradients de propriétés a été découvert par une équipe de chercheurs japonais à la fin des années 80. Ces derniers possèdent des propriétés mécaniques qui varient lentement et de façon continue dans l'une des directions de la structure et ce, pour surmonter le problème existant chez les structures multicouches classiques où des couches homogènes qui sont collées les unes aux autres pour améliorer les performances (mécaniques, thermiques, acoustique,...) des structures en plaques renforcées par des matériaux composites. Ceci provoque la création des concentrations de contraintes au niveau des interfaces entre les couches qui peuvent conduire aux délaminages, à des fissures, et à d'autres mécanismes d'endommagement en raison du changement brutal des propriétés mécaniques et thermiques d'une couche à l'autre. Les matériaux à gradients de propriétés (FGM) ont été développés pour leurs excellentes propriétés mécaniques et thermiques. Ces matériaux ont de grandes performances et sont capables de résister à des températures ultra-hautes. Les FGM sont perçus au microscope comme des matériaux composites non homogènes. Ces matériaux sont généralement conçus à partir d'un mélange de métaux et de céramique. L'avantage de ces matériaux est leurs résistances

aux hautes températures tout en maintenant leurs propriétés structurales. De plus, les FGM possèdent aussi des propriétés qui changent graduellement et sans interruption afin de réaliser une fonction désirée. Un FGM typique, avec un effet élevé de couplage flexion membrane, est un composite homogène fabriqué à partir de différentes phases de composants de matériaux (le plus souvent en céramique et métal). La composition change d'une surface en céramique à une surface en métal avec une variation voulue de la fraction volumique des deux matériaux entre les deux surfaces. Depuis l'apparition des FGM, des investigations ont été entrepris pour développer des matériaux à haute résistance basée sur les matériaux à gradient fonctionnel Ces matériaux ont été initialement conçus comme des matériaux agissant comme barrière thermique pour les structures aérospatiales et les réacteurs de fusion Ils sont maintenant développés pour un usage général en tant que composants structuraux dans un environnement de haute température dans le domaine militaire, automobile, biomédical, l'industrie de semi-conducteur et toutes utilisations dans un environnement à hautes températures (Boukhlef, F, 2020).

Ces types de matériaux, ont suscité beaucoup d'attention récemment en raison des avantages qu'ils possèdent. En effet ces derniers diminuent la disparité dans les propriétés matérielles et de réduisent les contraintes thermiques. La variation continue des propriétés mécaniques confère au matériau un comportement optimisé. La plupart des « FGM » sont composés de céramiques et de métaux dont les propriétés mécaniques sont comparées dans le Tableau III.03

Tableau III. 3: Comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal.

Face et Matériau	Propriétés
La face à haute température (Céramique)	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne résistance thermique ; - Bonne résistance à l'oxydation ; - Faible conductivité thermique.
Couches intermédiaires (Céramique-métal)	<ul style="list-style-type: none"> - Élimination des problèmes de l'interface ; - Relaxer les contraintes thermiques.
La face à basse température (Métal)	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne résistance mécanique ; - Conductivité thermique élevée ; - Très bonne ténacité.

III.5.1 Concept des matériaux à gradient de propriétés

Les matériaux à gradient de propriété (FGM) se définissent par leurs capacités à résister à une Température de surface de 2000 K et à une variation de température de 1000 K à travers une section inférieure à 10 mm. Les changements continus de la composition, la microstructure, et la porosité de ces matériaux résultent des changements de propriétés, plus précisément les

Propriétés mécaniques et la conductivité thermique. Le matériau à gradient de propriétés (FGM) représente un des derniers développements du 21ème siècle. Le concept de FGM est fait remarquer non seulement dans la conception pratique des matériaux réfractaires mais également dans le développement de divers matériaux graduels, pour lesquels la fraction volumique des fibres des constituants change sans interruption en fonction de la position le long d'une direction. Ce matériau présente l'avantage d'éviter la concentration des contraintes d'interfaces se développant dans les matériaux composites conventionnels. La composition et la microstructure changent dans l'espace suivant une loi de distribution prédéfinie. Cela est dû au fait que les constituants céramiques des FGM sont capables de résister à des environnements à haute température en raison de leurs meilleures caractéristiques de résistance thermique. De plus, les constituants métalliques fournissent des performances mécaniques plus élevées et réduisent la possibilité de fracture catastrophique. Une microstructure graduée en continu avec des constituants métalliques/céramiques est représentée sur la Figure III. 05. Récemment, ont présenté une revue des principaux développements des FGM, notamment le transfert de chaleur, les contraintes, les instabilités ainsi que les analyses dynamiques vibratoires, la fabrication et la conception. Ces matériaux composites offrent de nombreux bénéfices aux propriétés, comme une résistance importante et une rigidité élevée. Actuellement, aucun matériau industriel n'est capable de résister à de tels chargements thermomécaniques.

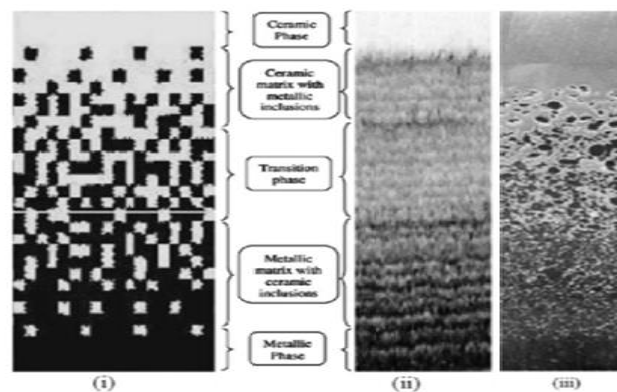


Figure III. 5 : Une vue de la microstructure des FGM. Graduation de la microstructure avec des inclusions métal-céramiques : (i) microstructure à gradient régulier, (ii) vue agrandie et (iii) FGM céramique-métal.

III.5.2 Fabrication des FGM

Dans l'industrie, le processus principal utilisé pour l'élaboration des matériaux FGM est la conception des dépôts par fusion (Fuse déposition Moding FDM). Le principe du procédé FDM illustre à la figure (III.5 a) peut-être décrit comme suit un matériau filamenteux est fondu et déposé sélectivement par un ordinateur tridimensionnel commandé par projection, formant une

couche de section transversale prédéfinie et refroidie rapidement ensuite, la couche déposée tombe d'une hauteur de couche et la couche suivante est déposée jusqu'à ce que la pièce entière soit fabriquée. Comme le montre (la figure III.5 b). Ont développé une méthode de triple extrusion pour contrôler le gradient de composition nécessaire à l'extrusion de la pâte. Une pièce en calcaire (CaCO_3) avec une couleur graduée peut être fabriquée en utilisant le FDM, comme le montre (la figure III.5c). Une pièce verte avec une composition graduée d'alumine (Al_2O_3) et de zircone (ZrO_2) a également été fabriquée. Dans un travail connexe de Singh et al des FGM Al/ Al_2O ont été préparées en utilisant une méthode qui combine le FDM avec la coulée à investissement (CT). Le procédé FDM est une technologie de production d'additifs (Additive Manufacturing AM) populaire qui offre des avantages de prototypage et qui est largement utilisée. La FDM est une méthode AM moins coûteuse qui utilise des matériaux onéreux et qui ne présente aucun risque de gaz toxiques et de contamination chimique. Cependant, après l'impression FDM, la surface est rugueuse, d'autres étapes sont donc nécessaires. La plus grande précision possible à ce jour n'est que de 0.1 mm. En raison du mouvement mécanique de la buse, une table d'appui est également nécessaire à cause de la faible vitesse d'injection.

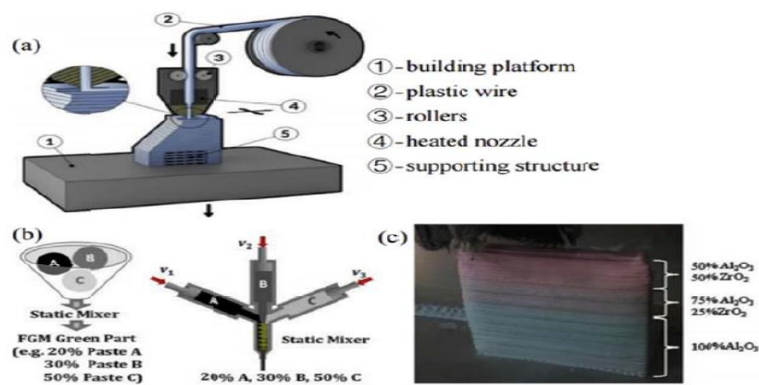


Figure III. 6 : (a) Schéma montrant les principes du FDM et (b) de la conception du mécanisme de la triple extrudeuse. (c) Un FGM composé d' Al_2O_3 et de ZrO_2 préparé par FDM

III.5.3 Les propriétés matérielles effective des FGM (homogénéisation)

Les FGM sont très hétérogènes, il sera très utile de les idéaliser comme continua avec leurs propriétés mécaniques variant continûment par rapport aux coordonnées spatiales. Les schémas d'homogénéisation sont nécessaires pour simplifier leurs microstructures hétérogènes complexes afin de les analyser d'une manière efficace. Des solutions fermées de certains problèmes fondamentaux de la mécanique des solides peuvent être obtenues par cette idéalisation et aussi il aidera à l'évolution et le développement de modèles numériques des

structures faites par les FGM. Il est à noter que la répartition de matière dans les structures des FGM peut être conçue pour diverses spécifications spatiales. Un FGM typique représente un composite de particules avec une distribution prescrite des fractions de volume des phases constitutives. Les propriétés des matériaux sont généralement supposées suivre une gradation à travers l'épaisseur d'une manière continue. Deux types de fraction volumique (variations/gradations) sont populaires dans la littérature qui couvre la plupart des modèles analytiques existants :

- Une variation par morceaux de la fraction volumique de la céramique ou du métal est assumée, et le FGM est pris pour être posé avec la même fraction volumique dans chaque région, c-à-d couche quasi-homogène de céramique-métal (figure III. 7a),
- Une variation continue de la fraction volumique de la céramique ou du métal est assumé (figure III.7.b), et la fraction volumique du métal peut être représentée comme une fonction de coordonnées suivant l'épaisseur (z) (Fahsi, A, 2018),

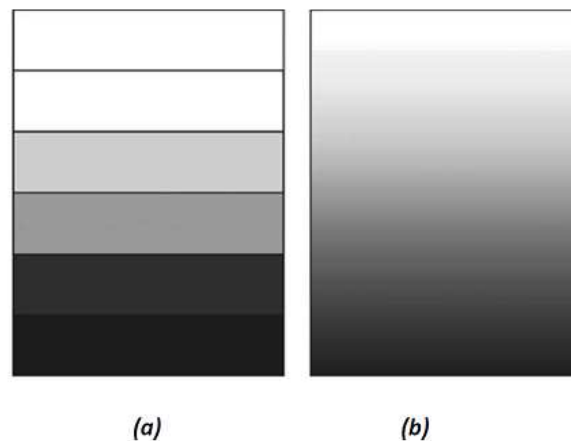


Figure III. 7 : Modèle analytique pour une couche d'un matériau à gradient fonctionnel.

III.5.4 Propriétés matérielles de la plaque P-FGM (loi de puissance)

La fraction volumique dans les P-FGM est assurée par une loi de puissance sous la forme :

$$V(z) = \left[\frac{z+h/2}{h} \right]^P \quad (\text{III.1})$$

Où p est un paramètre du matériau et h est l'épaisseur de la plaque. Une fois que la fraction de volume local $V(z)$ est définie, les propriétés matérielles d'une plaque P-FGM peuvent être déterminées par la loi des mélanges :

$$E(z) = E_m + (E_c - E_m) V(z) \quad (\text{III.2})$$

Où E_m et E_c sont respectivement les modules de Young de la surface inférieure ($z = -h / 2$) et de la surface supérieure ($z = h / 2$) de la plaque FGM, la variation de la fraction volumique des phases en termes de p est représentée sur (la figure III.08), il apparait clairement que la fraction volumique change rapidement près de surface inférieure pour $k < 1$, et augmenté rapidement près de la surface supérieure pour $k > 1$.

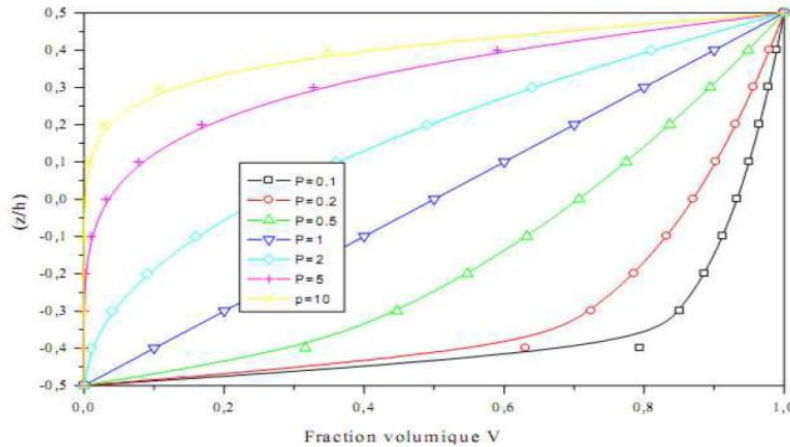


Figure III. 8 : Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM.

III.5.8 Propriétés matérielles de la plaque S-FGM

Dans le cas d'ajoute une plaque P-FGM d'une simple fonction de loi de puissance à une plaque composite multicouche, les concentrations des contraintes apparaissent sur l'interfaces où le matériau est continu mais change rapidement. Par conséquent, Chung et chi ont défini la fraction de volume de la plaque FGM en utilisant deux fonctions de loi de puissance pour assurer une bonne distribution des contraintes parmi toutes les interfaces. Cette distribution appelé la fonction sigmoïde.

$$V1(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{h+z}{h/2} \right)^k \text{ Pour } - h/2 \leq z \leq 0 \tag{III.3.a}$$

$$V2(z) = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{h-z}{h/2} \right)^k \text{ pour } 0 \leq z \leq h/2 \tag{III.3.b}$$

Les deux fonctions de loi de puissance sont définies par montre que la variation de la fraction volumique dans les équations (I.3.a) et (I.3.b) représente les distributions sigmoïdes, et cette plaque FGM est appelée (Plaque S-FGM).

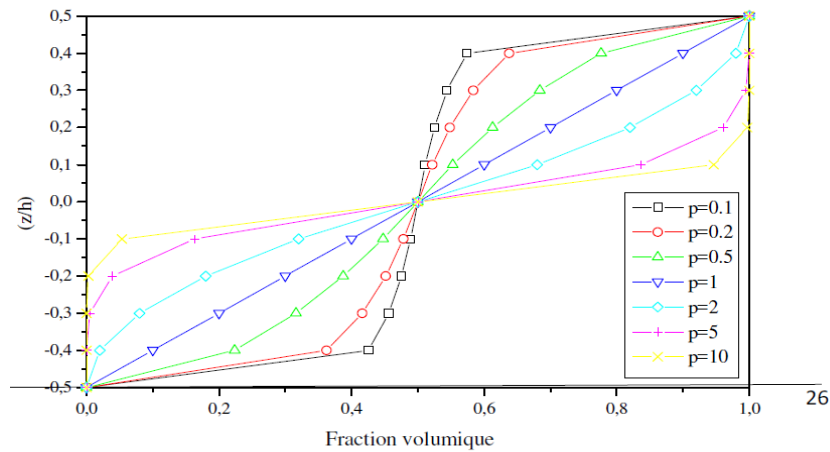


Figure III. 9 : Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM. (Loi Sigmoïde).

(Guenfoud, H,2019)

III.5.9. Propriétés matérielles de la plaque E-FGM (Loi Exponentielle)

Cette idéalisation particulière pour la modélisation des FGM s’est très répandue dans les études de mécanique de la rupture. Pour une structure faite de FGM avec 'h' une épaisseur uniforme, les propriétés typiques des matériaux P(z) à tout point situé à une distance "z" de la surface de référence est donné par :

$$S(z) = A. e^{B(z+\frac{m}{2})} \tag{III.4.a}$$

Avec :

$$A= S_2 \text{ et } B=\frac{1}{h} \ln \left(\frac{S_1}{S_2} \right) \tag{III.4. b}$$

La variation du module de Young à travers l’épaisseur de la plaque E-FGM est représentée dans la figure III.10.

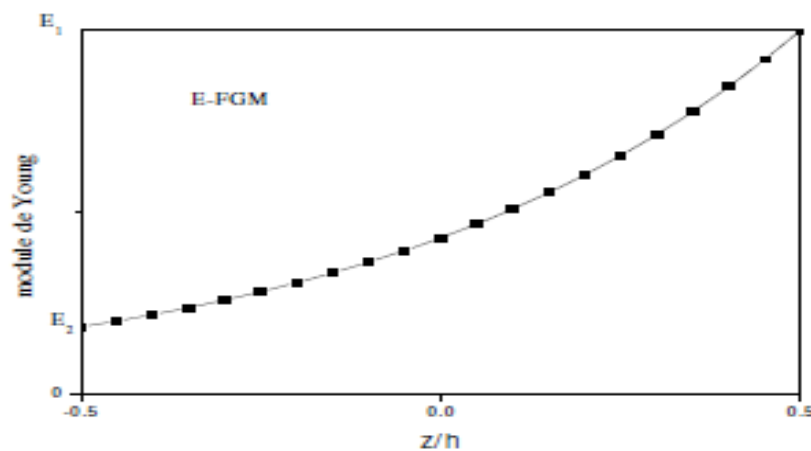


Figure III. 10 : Variation du module de Young de la plaque E-FGM

III.6 Comparaison des matériaux types FGM et les matériaux composites traditionnels

Généralement, les F.G.M sont des matériaux constitués de plusieurs couches contenant des composants différents tels que les céramiques et les métaux. Ils sont donc des composites présentant des caractéristiques macroscopique menti homogènes. Le changement continu dans la composition et donc dans la microstructure du matériau distingue les F.G.M des matériaux composites conventionnels comme illustré sur la figure III.11 en résulte un gradient qui déterminera les propriétés matérielles des FGM. Dans certains cas, on peut avoir un FGM constitué d'un même matériau mais de microstructure différente Le concept FGM peut être appliqué dans divers domaines pour des usages structuraux et fonctionnels. Au Japon, plusieurs programmes ont été conduits au cours des années 80 et 90 afin de développer l'architecture des FGM, et d'étudier également ces matériaux pour les applications de hautes températures (par exemple, éléments pour navettes spatiales hypersoniques) ainsi que pour des applications fonctionnelles (par exemple, convertisseurs thermoélectriques et thermo-ioniques). Ces programmes ont conduit au développement de la conception architecturale du FGM et de ces perspectives.

Propriétés	<p>1 Résistance mécanique</p> <p>2 Conductivité thermique</p>		
Structure	<p>Éléments constitutifs:</p> <p>céramique ○</p> <p>métal ●</p> <p>microporosité ◌</p> <p>fibres ◇*</p>		
Matériaux	exemple	FGM	NON-FGM

Figure III. 11 : Caractéristiques des matériaux composites FGM en comparaison avec les matériaux composites conventionnels.

Établi un modèle simple illustrant les différences entre les matériaux à gradient de propriétés (FGM) et les matériaux plus conventionnels (Figure III.12).

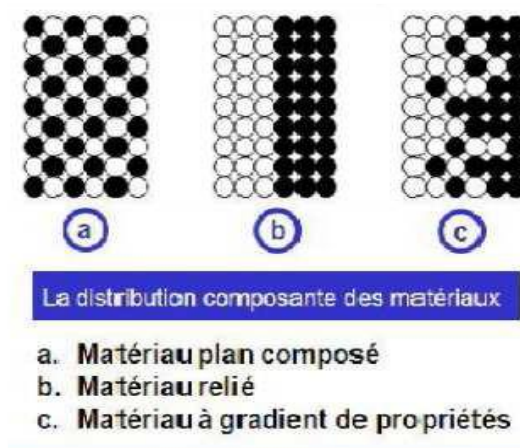


Figure III. 12 : La distribution composante des matériaux.

Le matériau plan composé à une caractéristique plane, et le matériau relié à une frontière sur l'interface de deux matériaux. Les FGM ont d'excellentes caractéristiques qui diffèrent de ceux des matériaux plans composés et reliés. Par conséquent, les FGM attirent l'attention en termes de leur application dans les domaines industriels puisqu'ils ont une double propriété des deux matières premières qui sont mélangées ensemble, et la distribution composante est graduée sans interruption. Par exemple, l'un des FGM qui se composent du métal et de la céramique a la caractéristique de la conductivité thermique et de la force métallique dans le côté en métal et la résistance aux hautes températures dans le côté en céramique

III.7. conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré l'évolution des matériaux composites en génie civil depuis les années 1980, en mettant en évidence leur intérêt croissant dans les laboratoires de recherche et les industries. Malgré leurs nombreux avantages, tels que leur légèreté, leurs propriétés mécaniques élevées et leur résistance à la corrosion, les composites présentent des défis liés à leur hétérogénéité et leur anisotropie, ainsi qu'à des problèmes structurels tels que le décollement et la durabilité. Face à ces limitations, les matériaux à gradient fonctionnel (FGM) apparaissent comme une alternative prometteuse. Nous avons défini ces matériaux, retracé leur développement, examiné leurs propriétés et exploré leurs domaines d'application. Leur variation spatiale et progressive des propriétés permettent la conception de structures innovantes, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour les applications dans les structures spéciales en génie civil.

Chapitre IV

Étude des contraintes d'interface d'une poutre en BA renforcée par une plaque FGM poreuse

IV. 1 Introduction

Ce chapitre présente une analyse des contraintes d'interface générées par l'application d'une plaque composite en FGM collée sur une poutre en béton armé endommagée. Cette étude vise à présenter l'influence de la variation du taux de distribution de porosité sur les contraintes d'interface.

Les matériaux composites sont désormais reconnus comme des matériaux innovants, particulièrement efficaces pour la réparation et le renforcement des structures en béton armé. Leur utilisation s'est d'abord imposée dans le domaine aéronautique, où ils ont démontré leur performance dans la réhabilitation des structures. Dans le secteur du génie civil, leur application s'est considérablement développée ces dernières années, notamment dans le cadre de la réhabilitation des structures en béton, suscitant un intérêt croissant auprès de la communauté scientifique.

Un enjeu majeur dans l'étude des poutres en béton renforcées par collage de plaques composites réside dans l'analyse des interactions à l'interface Béton–Composite. Ces interactions sont essentielles, car elles assurent le transfert des contraintes de la poutre vers la plaque. Lorsque ces contraintes dépassent un certain seuil critique, elles peuvent provoquer une rupture prématurée de l'élément renforcé.

Au cours de la dernière décennie, de nombreuses recherches ont été consacrées à la caractérisation des contraintes d'interface dans ce type d'assemblage. Ces travaux ont mis en évidence que les contraintes de cisaillement et les contraintes normales au niveau de l'interface dépendent fortement des propriétés du matériau composite utilisé ainsi que des caractéristiques géométriques de la poutre en béton.

IV. 2 Analyse théorique

Dans la présente étude, et dans le but de déterminer les contraintes d'interface au niveau de la couche adhésive, un modèle théorique a été élaboré sur la base des hypothèses suivantes :

- La poutre en béton armé, la couche adhésive et la plaque composite présentent un comportement élastique linéaire.
- Les contraintes dans la couche adhésive sont supposées constantes sur toute son épaisseur.
- L'adhérence entre la poutre en béton armé et la plaque composite est considérée comme parfaite.
- Le rôle de l'adhésif est de transmettre les contraintes de la poutre vers la plaque composite.



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

Les déformations des deux adhérents (la poutre et la plaque composite) résultent des moments de flexion et des efforts normaux. Un élément infinitésimal dx de la poutre renforcée, représenté à la figure IV.1, est détaillé dans la figure IV.2. Cette dernière illustre, d'une part, les contraintes normales et de cisaillement à l'interface, et d'autre part, la convention des signes adoptée pour le moment fléchissant, l'effort tranchant, l'effort normal ainsi que le chargement appliqué.

Dans le cadre de cette analyse, un comportement élastique linéaire est supposé pour les trois matériaux constituants : la poutre en béton armé, la couche adhésive et la plaque composite. La couche d'adhésif est considérée comme assurant exclusivement le transfert des contraintes de la poutre vers la plaque composite, avec des contraintes supposées constantes sur l'épaisseur de cette couche.

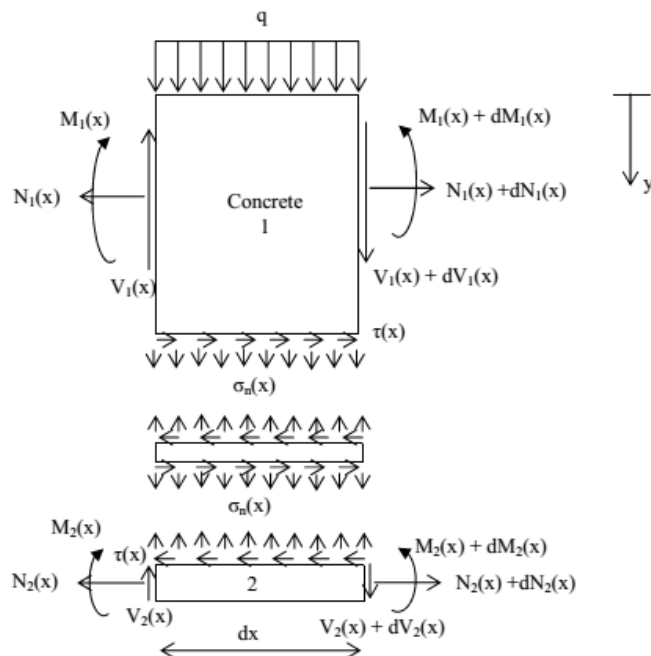


Figure IV. 2 : Un segment différentiel de la poutre renforcée

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. 1: La loi de mélange générale d'un matériau FGM poreux et sans poreux
(Tounsi, 2005)

Type -I : sans porosité	$E = (E_c - E_m) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^k + E_m$
Type-II: 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-III: 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-IV: 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-V: 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-VI: 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 . α est la fraction volumique de porosité. Les propriétés matérielles d'une plaque FGM parfaite peuvent être obtenues lorsque α est mis à zéro. E_c et E_m sont les modules de Young de 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 :

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{eM_1(x)}{E_1 I_1} - \frac{N_1(x)}{E_1 A_1} \quad (IV. 06)$$

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 :

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = -\frac{t_2}{2E_2 b_2} M_2(x) + \frac{N_2(x)}{E_2 b_2} \quad \text{Où et sont les déplacements horizontaux de la (IV.07)}$$

poutre et la plaque composite respectivement. Et sont respectivement les moments de flexion appliqués à la poutre et la plaque composite ; est le module de Young de la poutre poreuse ; et le module de Young du composite ;

Le moment d'inertie, e est la distance entre l'axe neutre à la fibre inférieure de la poutre, 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 :

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

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

$$\text{Dans la direction } y : \frac{dv_1(x)}{dx} = -[\sigma(x)b_2 + qb_1] \quad (\text{IV.09})$$

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

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

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

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

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

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

Où 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 :

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

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

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

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

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

Avec :

$$R = \frac{E_1 I_1 D_{11}}{b_2} \quad , \text{ Avec R : Coefficient de transfert du moment} \quad (IV.18)$$

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

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

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

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

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 :

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

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

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

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

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

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

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

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 :

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

La solution présentée ci-dessus est limitée pour un chargement uniformément réparti pour le quel $d^2 V_T(x)/dx^2 = 0$, 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 :

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

B1 et B2 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), B2 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 B1 :

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

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

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 :

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

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

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

Et sont respectivement les déplacements verticaux de l'adhérent 1 et 2.

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

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

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

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

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 :

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

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

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 :

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

La solution générale de cette équation est donnée par (Theillout, 1997) :

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

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 :

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

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

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

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

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

Cette section présente l'analyse des contraintes d'interface dans une poutre en béton armé renforcée par une plaque poreuse en matériau à gradient de propriétés (FGM). Différents taux de distribution de porosité sont pris en compte dans cette étude. La poutre est soumise à un chargement uniformément réparti. Les propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans la présente analyse sont portées dans le tableau IV.2

Tableau IV. 2 : Propriétés mécaniques des matériaux utilisés.

Matériaux	E (GPa)	G (GPa)	Largueur (mm)	Hauteur (Epaisseur) (mm)
Béton	30	/	$b_1=200$	$t_1=300$
Alumina (Al_2O_3)	380	/	$b_2=200$	$t_2=4$
Zirconia (ZrO_2)	151	/	$b_2=200$	$t_2=4$
Titane (Ti-6Al-4V)	105.7	/	$b_2=200$	$t_2=4$
Aluminium oxide (Alum-oxide)	320.2	/	$b_2=200$	$t_2=4$
Aluminium (Al)	70	/	$b_2=200$	$t_2=4$
CFRP	140	/	$b_2=200$	$t_2=4$
Adhésif	3	5	$ba=200$	$ta=2$

Tableau IV. 3 : Comparaison des contraintes d'interface d'une poutre en béton dégradée renforcée par une plaque composite et FGM.

Tounsi (2005)		Présente méthode							
GFRP	CFRP	GFRP		CFRP		FGM k=2		FGM k=5	
		Facteur d'endommagement D							
		0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1
1.0885	1.791	1.0856	1.1558	1.7914	1.8960	2.1004	2.2150	1.5762	1.6717
0.826	1.078	0.82607	0.88282	1.0779	1.1453	1.1646	1.2330	1.0097	1.0749

Tableau IV.3 présente une comparaison des résultats des contraintes d'interface (contraintes normales et contraintes tangentielles) d'une poutre en béton armé renforcée par différents types de plaques (CFRP, GFRP, FGM). La poutre en béton armé est considérée parfaite ($D=0$) et endommagée ($D=0.1$). L'indice de puissance est pris égal à $k=2$ et 5 . A partir de ce tableau on peut constater que les résultats coïncident avec ceux du Tounsi (2005) pour une poutre non-endommagée et renforcée par une plaque composite (CFRP, GFRP).

Tableau IV. 4 : Effet du taux de distribution de porosité ainsi que le facteur d'endommagement D sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM poreuse ($\alpha=0.2$)

Facteur d'endommagement indice de puissance		D=0		D=0.1		D=0.2	
		$\tau(x)$	$\sigma_n(x)$	$\tau(x)$	$\sigma_n(x)$	$\tau(x)$	$\sigma_n(x)$
		(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
k= 2	Type II	1.9922	1.1356	2.1036	1.2038	2.2304	1.2821
	Type III	1.9761	1.1312	2.0870	1.1993	2.2134	1.2777
	Type IV	2.0223	1.1440	2.1346	1.2122	2.2625	1.2907
	Type V	2.0029	1.1386	2.1148	1.2069	2.2419	1.2852
	Type VI	1.9837	1.1334	2.0948	1.2016	2.2214	1.2798
k= 5	Type II	1.4858	0.97872	1.5772	1.0428	1.6830	1.1174
	Type III	1.6158	1.0227	1.7132	1.0885	1.8253	1.1644
	Type IV	1.4749	0.97503	1.5658	1.0390	1.6709	1.1134
	Type V	1.4721	0.97412	1.5628	1.0381	1.6679	1.1125
	Type VI	1.5178	0.98983	1.6108	1.0544	1.7182	1.1293

Le tableau IV.4 illustre l'effet du facteur de dégradation D et de la variation du taux de distribution de porosité sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque poreuse en matériau FGM. En comparant les valeurs des contraintes de cisaillement et des contraintes normales pour différentes valeurs de D (0, 0.1, 0.2) et pour deux coefficients k, on observe que l'augmentation du facteur de dégradation entraîne une élévation notable des contraintes à l'interface. Ce comportement met en évidence que la détérioration du béton armé accentue les sollicitations mécaniques transférées à la plaque de renforcement.

Tableau IV. 5 : Effet du taux de distribution de porosité sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton dégradée (D=0.2) renforcée par une plaque FGM poreuse

	Type de distribution de porosité	$\alpha = 0.1$		$\alpha = 0.15$		$\alpha = 0.2$	
		$\tau(x)$	$\sigma_n(x)$	$\tau(x)$	$\sigma_n(x)$	$\tau(x)$	$\sigma_n(x)$
		(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
k= 2	Type II	2.2800	1.2948	2.2524	1.2878	2.2304	1.2822
	Type III	2.2606	1.2900	2.2298	1.2820	2.2134	1.2777
	Type IV	2.3011	1.3003	2.2809	1.2951	2.2625	1.2907
	Type V	2.2882	1.2972	2.2633	1.2906	2.2419	1.2852
	Type VI	2.2721	1.2930	2.2425	1.2852	2.2214	1.2797
k= 5	Type II	1.6873	1.1191	1.6664	1.1119	1.6830	1.1174
	Type III	1.6698	1.1131	1.6845	1.1182	1.8253	1.1644
	Type IV	1.7146	1.1282	1.6885	1.1193	1.6709	1.1136
	Type V	1.6973	1.1224	1.6716	1.1137	1.6679	1.1125
	Type VI	1.6789	1.1160	1.6675	1.1122	1.7182	1.1296

Tableau IV.5 présente l'influence de la variation de la fraction volumique de porosité sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton armé et endommagée renforcée par une plaque FGM. La fraction volumique de porosité est pris égal $\alpha=0.1, 0.15$ et 0.2 . L'indice de puissance k est considéré égal $k=2$ et 5 . Il est clair que les contraintes normales et tangentielles deviennent plus faibles à mesure que la fraction volumique de porosité augmente dans la plaque de renforcement FGM. De plus, l'augmentation du coefficient de distribution de porosité (k) de 2 à 5 contribue également à la diminution des contraintes, renforçant l'efficacité de la plaque dans le renforcement de la poutre en béton.

Tableau IV. 6 : 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 dégradée ($D=0.2$) renforcée par une plaque FGM poreuse ($\alpha=0.2$).

		Al/Al ₂ O ₃		Al/ZrO ₂		Ti-6Al-4V/Aluminum oxyde	
		$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)	$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)	$\tau(x)$ (MPA)	$\sigma_n(x)$ (MPA)
k= 2	Type II	2.2304	1.2821	1.5215	1.0603	2.0713	1.2388
	Type III	2.2134	1.2777	1.4867	1.0475	2.0249	1.2255
	Type IV	2.2625	1.2907	1.5557	1.0730	2.1189	1.2522
	Type V	2.2419	1.2852	1.5352	1.0654	2.0901	1.2442
	Type VI	2.2214	1.2798	1.5076	1.0553	2.0524	1.2332
k= 5	Type II	1.6830	1.1174	1.2760	0.96545	1.5974	1.0879
	Type III	1.8253	1.1644	1.2299	0.94619	1.5234	1.0612
	Type IV	1.6709	1.1134	1.3210	0.98365	1.6731	1.1141
	Type V	1.6679	1.2821	1.2941	0.97275	1.6276	1.0985
	Type VI	1.7182	1.2777	1.2578	0.95805	1.5673	1.0769

L'influence du type de la plaque de renforcement sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton armé renforcée par trois types de plaques FGM est présenté dans le tableau IV. 6. le facteur d'endommagement est pris égal à $D=0.2$. La plaque de renforcement est considérée en Al/Al₂O₃, Al/ZrO₂ et en Ti-6Al-4V/Aluminum oxyde. A partir de ces résultats on peut constater que les contraintes normales et tangentielles deviennent plus faibles quand la plaque de renforcement est en Al/ZrO₂.

Tableau IV. 7: 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 dégradée ($D=0.2$) renforcée par une plaque FGM poreuse ($\alpha=0.2$).

		$t_2=4$		$t_2=6$		$t_2=8$	
		$\tau(x)$ (MPa)	$\sigma_n(x)$ (MPa)	$\tau(x)$ (MPa)	$\sigma_n(x)$ (MPa)	$\tau(x)$ (MPa)	$\sigma_n(x)$ (MPa)
k= 2	Type II	2.2304	1.2821	2.6003	1.6832	2.8571	2.0227
	Type III	2.2134	1.2777	2.5828	1.6785	2.8398	2.0181
	Type IV	2.2625	1.2907	2.6332	1.6917	2.8891	2.0311
	Type V	2.2419	1.2852	2.6121	1.6859	2.8685	2.0255
	Type VI	2.2214	1.2798	2.5909	1.6803	2.8480	2.0203
k= 5	Type II	1.6830	1.1174	2.0132	1.4984	2.2617	1.8317
	Type III	1.8253	1.1644	2.1701	1.5536	2.4251	1.8915
	Type IV	1.6709	1.1134	1.9998	1.4933	2.2477	1.8267
	Type V	2.2304	1.2821	1.9964	1.4922	2.2440	1.8252
	Type VI	2.2134	1.2777	2.0524	1.5126	2.3026	1.8474

Tableau IV.7 montre l'effet de l'épaisseur de la plaque de renforcement sur les contraintes d'interface d'une poutre endommagée renforcée par une plaque FGM. La plaque de renforcement FGM est considérée poreuse ($\alpha=0.2$). Les résultats montrent que l'augmentation de l'épaisseur de la plaque de renforcement (t_2) entraîne une augmentation des contraintes d'interface.

Tableau IV. 8: 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 dégradée (D=0.2) 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= 2	Type II	2.0649	1.1800	1.9252	1.0951	1.8053	1.0226
	Type III	2.0484	1.1755	1.9095	1.0907	1.7903	1.0183
	Type IV	2.0956	1.1884	1.9546	1.1032	1.8337	1.0308
	Type V	2.0758	1.1830	1.9356	1.0980	1.8155	1.0257
	Type VI	2.0561	1.1776	1.9168	1.0928	1.7974	1.0206
k= 5	Type II	1.5452	1.0204	1.4314	0.94095	1.3355	0.87439
	Type III	1.6791	1.0653	1.5578	0.98384	1.4550	0.91520
	Type IV	1.5339	1.0164	1.4208	0.93720	1.3255	0.87092
	Type V	1.5311	1.0157	1.4181	0.93638	1.3229	0.87005
	Type VI	1.5782	1.0316	1.4625	0.95164	1.3648	0.88457

Le tableau IV.8 évalue l'effet du module d'Young de la poutre en béton armé sur les contraintes d'interface. Il ressort que l'augmentation du module d'Young E1 (de 35 000 à 45 000 MPa) tend à réduire les contraintes d'interface, ce qui reflète une capacité moindre du béton dégradé à transférer les efforts mécaniques vers la plaque de renforcement. On observe également que la variation du taux de distribution de porosité influe significativement sur les contraintes normales et tangentielles à l'interface.

Tableau IV. 9 : 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 dégradée (D=0.2) renforcée par une plaque FGM poreuse ($\alpha=0.2$).

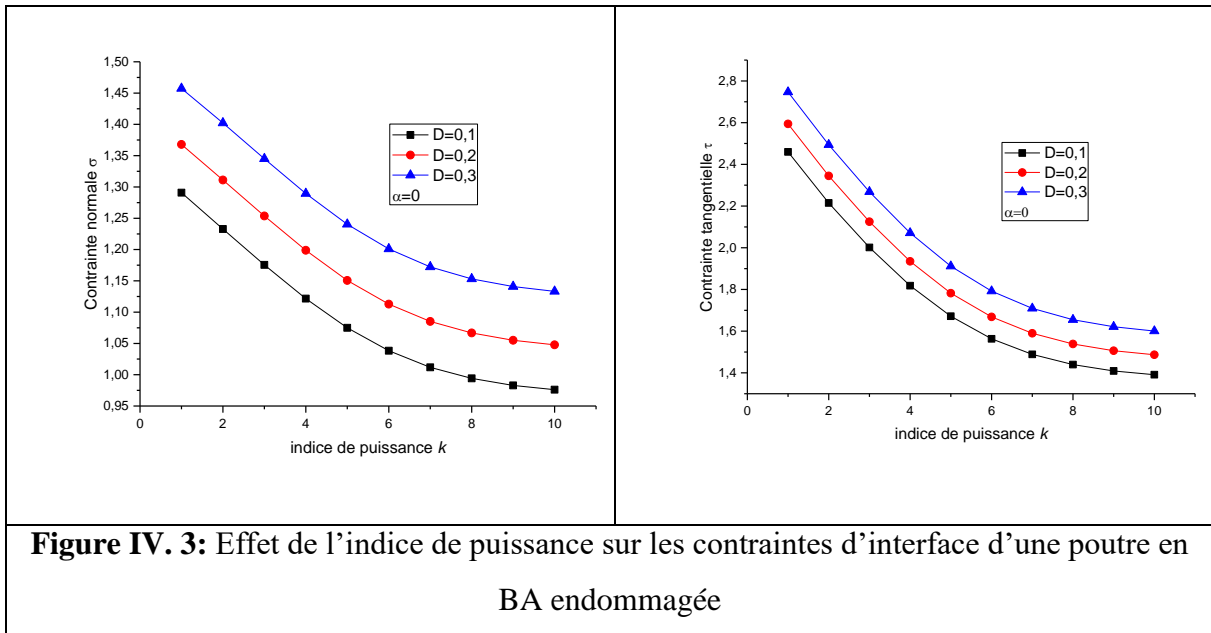
		Ea=3000		Ea=4000		Ea=5000	
		$\tau(x)$ (MPa)	$\sigma_n(x)$ (MPa)	$\tau(x)$ (MPa)	$\sigma_n(x)$ (MPa)	$\tau(x)$ (MPa)	$\sigma_n(x)$ (MPa)
k= 2	Type II	2.2304	1.2821	2.2666	1.4069	2.2893	1.5087
	Type III	2.2134	1.2777	2.2493	1.4019	2.2720	1.5037
	Type IV	2.2625	1.2907	2.2991	1.4159	2.3223	1.5188
	Type V	2.2419	1.2852	2.2781	1.4102	2.3011	1.5125
	Type VI	2.2214	1.2798	2.2574	1.4043	2.2802	1.5059
k= 5	Type II	1.6830	1.1174	1.7112	1.2269	1.7290	1.3156
	Type III	1.8253	1.1644	1.2781	1.2781	1.8747	1.3706
	Type IV	1.6709	1.1134	1.6990	1.2222	1.7166	1.3108
	Type V	2.2304	1.2821	1.6958	1.2210	1.7135	1.3097
	Type VI	2.2134	1.2777	1.7468	1.2395	1.7650	1.3295

Tableau IV.9 analyse l'effet combiné de la variation du taux de distribution de porosité et la variation du module d'Young de l'adhésif (Ea) sur les contraintes d'interface. On observe que l'augmentation du module d'Young Ea de 3000 à 5000 MPa augmente notablement les valeurs des contraintes d'interface ($\tau(x)$ et $\sigma(x)$).

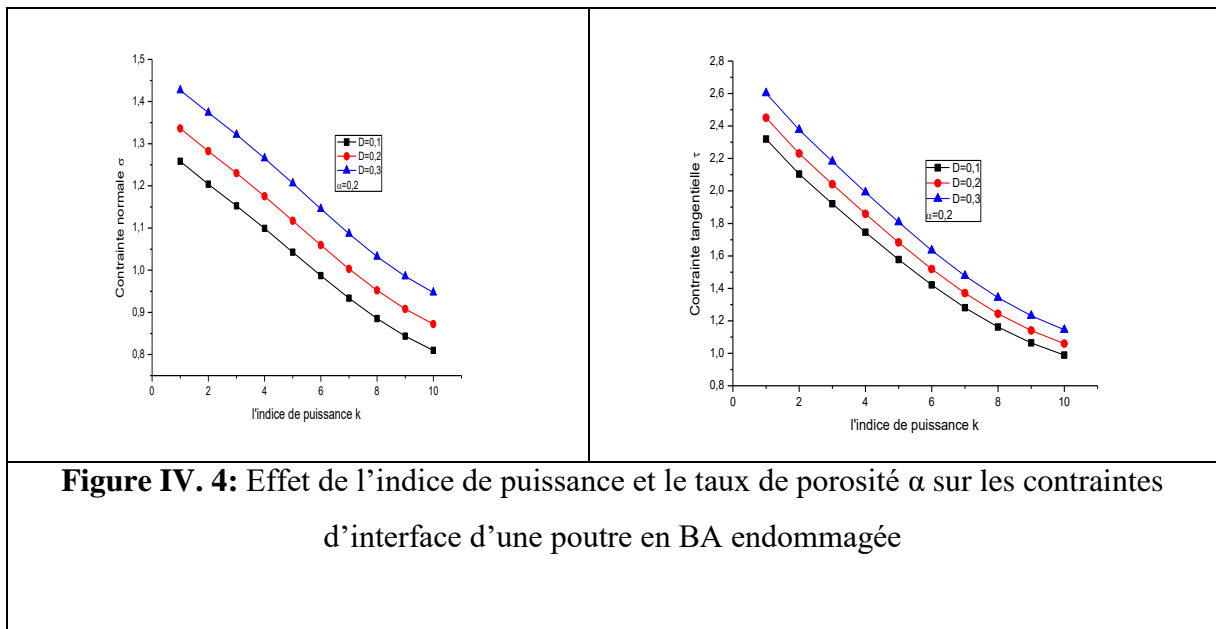
Tableau IV. 10: Effet du taux de distribution de porosité ainsi que la longueur de la région non renforcée sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton dégradée (D=0.2) renforcée par une plaque FGM poreuse ($\alpha=0.2$)

		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= 2	Type II	0.82103	0.46879	1.1255	0.64448	1.7005	0.97616
	Type III	0.81268	0.46604	1.1153	0.64138	1.6868	0.97246
	Type IV	0.83690	0.47402	1.1449	0.65042	1.7266	0.98366
	Type V	0.82674	0.47069	1.1325	0.64666	1.7099	0.97897
	Type VI	0.81660	0.46737	1.1201	0.64290	1.6932	0.97426
k= 5	Type II	0.56401	0.37461	0.80551	0.53490	1.2620	0.83794
	Type III	0.62832	0.40023	0.88674	0.56519	1.3750	0.87691
	Type IV	0.55868	0.37245	0.79875	0.53235	1.2524	0.83456
	Type V	0.55730	0.37190	0.79699	0.53171	1.2500	0.83374
	Type VI	0.57971	0.38101	0.82543	0.54250	1.2899	0.84782

Tableau IV.10 présente l'effet de la longueur de la zone non renforcée (a) sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton dégradée, renforcée par une plaque FGM poreuse. On remarque que l'augmentation de la longueur de la zone non renforcée (de a = 50 à a = 200) entraîne une augmentation significative des contraintes de cisaillement ($\tau(x)$) et normales ($\sigma(x)$).



La figure IV.3 illustre l'effet de l'indice de puissance k sur les contraintes normales et tangentielles à l'interface entre une poutre en béton armé endommagée et une plaque de renforcement en matériau à propriétés graduées (FGM). Il apparaît que l'augmentation de l'indice k entraîne une diminution progressive des contraintes à l'interface, ce qui suggère une réduction du risque de décollement. Par ailleurs, les résultats indiquent que plus le taux de porosité D est élevé, plus les contraintes à l'interface augmentent, mettant en évidence l'effet défavorable du facteur d'endommagement sur l'efficacité du renforcement.



La figure IV.4 illustre l'influence du facteur d'endommagement sur les contraintes normales et tangentielles d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque FGM poreuse. La fraction

volumique de porosité est pris égale à $\alpha=0.2$. En comparant les figures IV.3 et IV.4, on peut conclure que les contraintes d'interface deviennent plus faible quand la plaque de renforcement est poreuse.

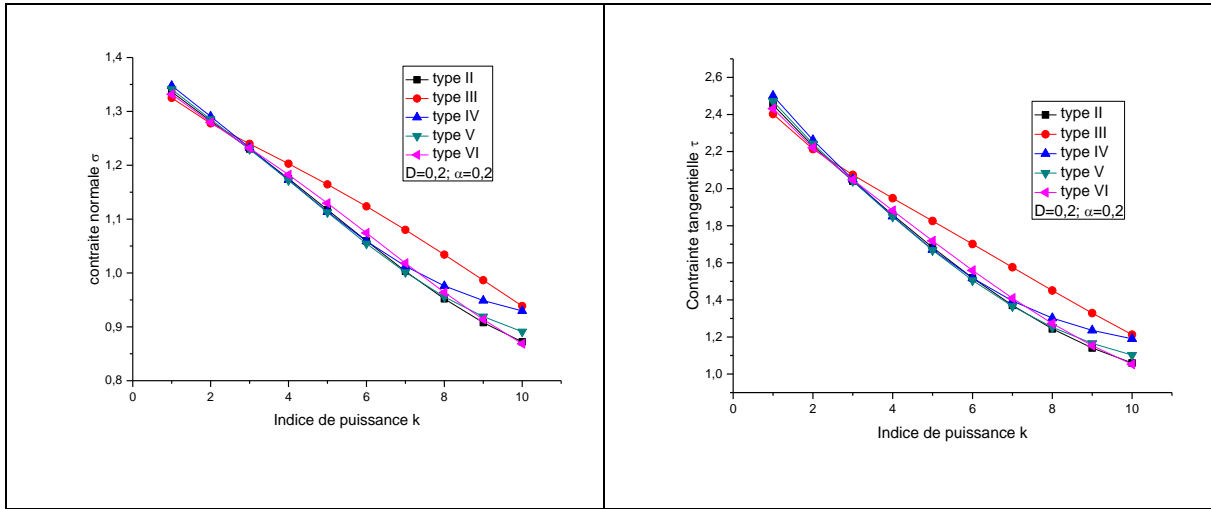


Figure IV. 5: Effet de la variation du taux de distribution de porosité en fonction de l'indice de puissance k sur les contraintes d'interface d'une poutre en BA endommagée

L'influence de la variation du mode de distribution de la porosité sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque poreuse en matériau FGM est présentée dans la figure IV.5. La fraction volumique de porosité est fixée à $\alpha=0,2$. Il ressort de cette analyse que les contraintes normales et tangentielles à l'interface deviennent plus importantes lorsque la distribution de la porosité est de type III.

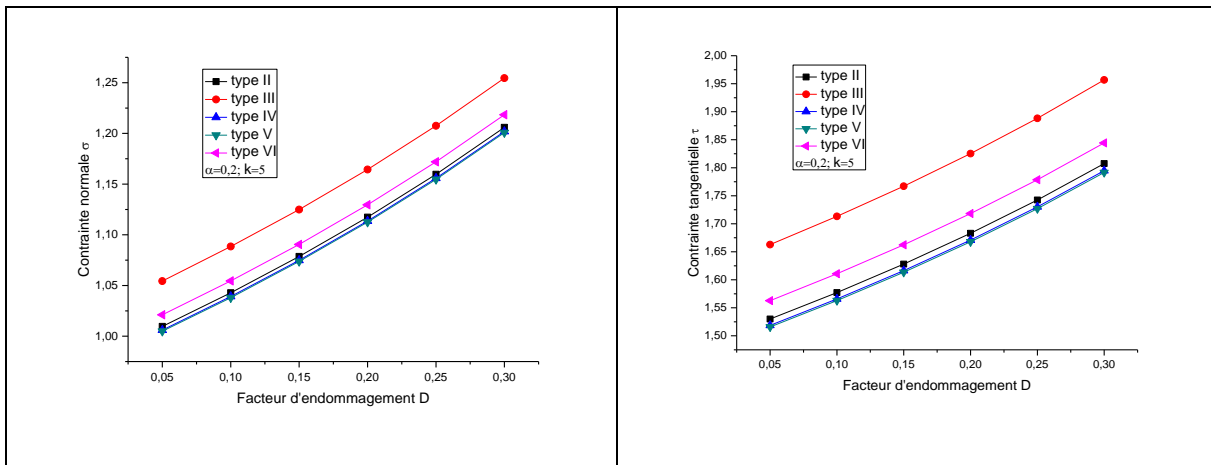
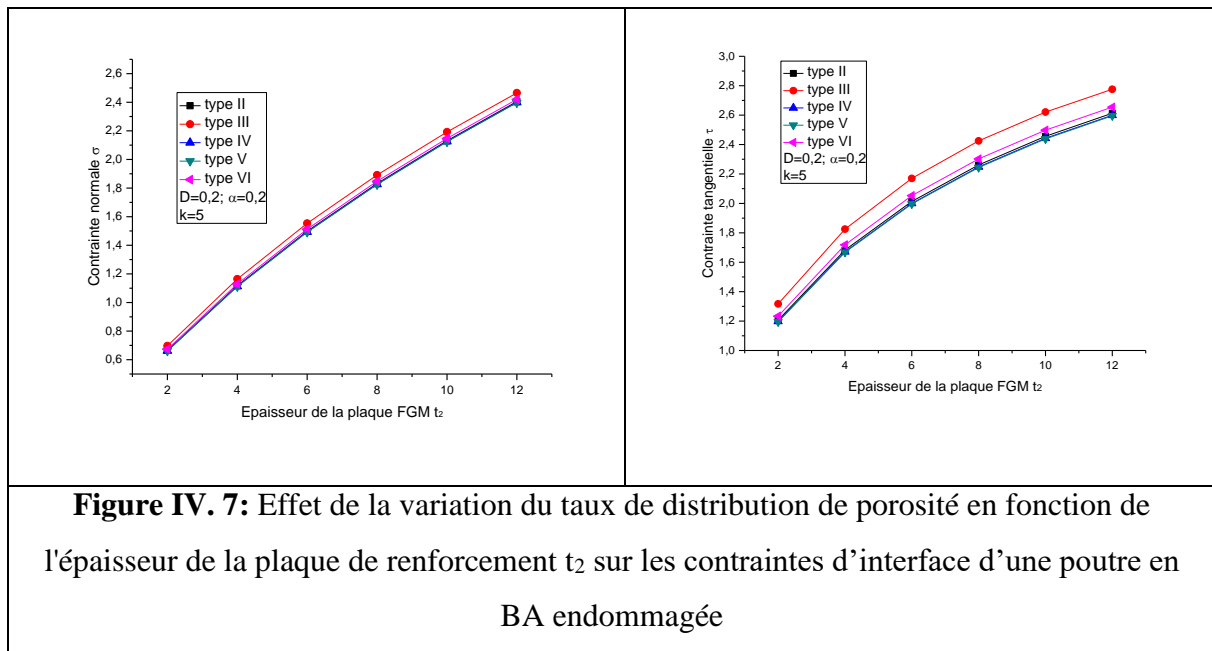


Figure IV. 6: Effet de la variation du taux de distribution de porosité en fonction de la variable d'endommagement D sur les contraintes d'interface d'une poutre en BA endommagée

La figure IV.6 illustre l'influence conjointe du taux de distribution de porosité et de la variable d'endommagement sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque en matériau FGM. Les résultats montrent que les contraintes d'interface augmentent avec la hausse de la variable d'endommagement. Par ailleurs, on observe que la distribution de porosité de type III génère systématiquement les contraintes les plus élevées, comparativement aux autres formes de distribution.



La figure IV. 7 présentes l'effet de la variation du taux de distribution de porosité en fonction de l'épaisseur de la plaque de renforcement t_2 sur les contraintes d'interface d'une poutre en BA endommagée. L'indice de puissance de la plaque de renforcement est pris égal à $k=5$. Il est clair que les contraintes normales et tangentiels deviennent plus importantes à mesure que l'épaisseur de la plaque de renforcement augmente.

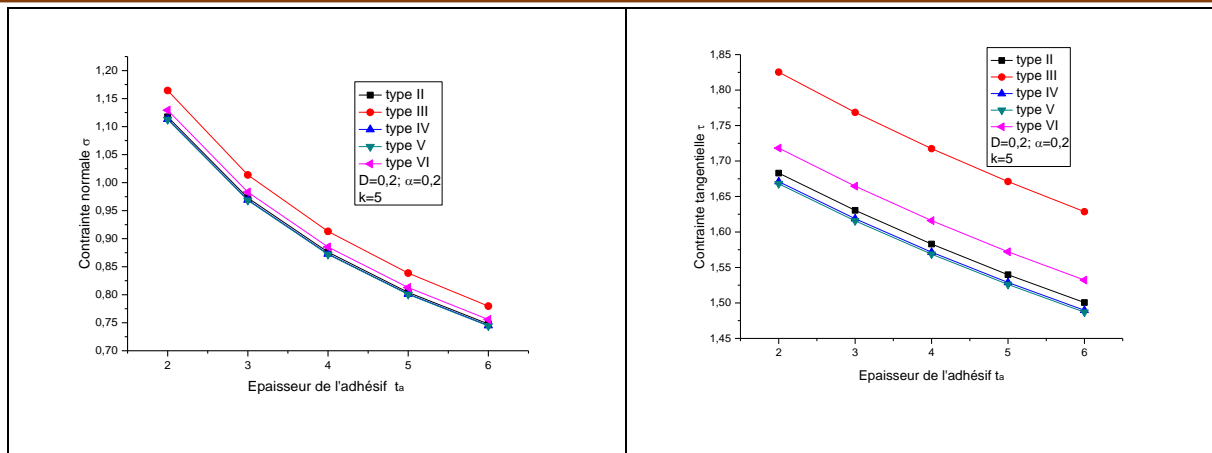


Figure IV. 8 : Effet de la variation du taux de distribution de porosité en fonction de l'épaisseur de la colle t_a sur les contraintes d'interface d'une poutre en BA endommagée

Effet de la variation du taux de distribution de porosité en fonction de l'épaisseur de la colle t_a sur les contraintes d'interface d'une poutre en BA endommagée est montré dans la figure IV.8. Le facteur d'endommagement est pris égal à $D=0.2$. L'indice de puissance est considéré égal à $k=5$. On peut constater que l'augmentation de l'épaisseur de la colle d'adhésive réduit les contraintes normales et tangentielles

IV.4. Conclusion

Dans cette étude théorique, l'influence de plusieurs paramètres sur l'évolution des contraintes à l'interface entre une poutre en béton armé et une plaque composite poreuse de type FGM a été analysée. Les résultats obtenus montrent que la variation de la distribution de la porosité, l'épaisseur de la plaque, le module d'Young du béton et de l'adhésif, ainsi que la longueur de la zone non renforcée, ont un impact significatif sur les contraintes d'interface. Il a été observé qu'une augmentation du taux de porosité et du coefficient de distribution améliore la compatibilité mécanique entre la plaque et le béton, tandis que la dégradation du béton ou la diminution de sa rigidité entraînent une augmentation marquée des contraintes à l'interface.

Conclusion générale

Conclusion générale

La durabilité des structures en béton armé constitue une préoccupation majeure dans le domaine du génie civil, notamment en raison des multiples agressions mécaniques, chimiques et environnementales auxquelles elles sont soumises au fil du temps. Ces agressions entraînent souvent une dégradation progressive des performances mécaniques du béton et de l'acier, compromettant ainsi la sécurité et la fonctionnalité des ouvrages. Dans ce contexte, le renforcement des structures endommagées ou vieillissantes s'impose comme une solution stratégique pour prolonger leur durée de vie et améliorer leur comportement sous charge.

Parmi les différentes techniques de renforcement, l'utilisation des matériaux composites a suscité un intérêt croissant en raison de leurs propriétés mécaniques élevées, de leur légèreté, de leur résistance à la corrosion et de leur facilité de mise en œuvre. Les plaques composites, notamment celles à gradient de propriétés (FGM, Functionally Graded Materials), offrent une alternative innovante, capable de réduire les concentrations de contraintes et d'assurer une meilleure compatibilité avec les matériaux du substrat.

Les matériaux FGM se distinguent par une transition progressive de leurs propriétés mécaniques d'un point à un autre, ce qui permet une adaptation optimale aux conditions locales de sollicitation. Ce comportement graduel contribue à améliorer l'adhérence à l'interface et à atténuer les discontinuités mécaniques entre les différentes couches.

La porosité peut être d'origine volontaire (dans le cas de certains procédés de fabrication) ou accidentelle (due à des défauts ou à la dégradation du matériau). Elle influence fortement les propriétés mécaniques de la plaque, notamment sa rigidité et sa capacité à transférer les charges. Une porosité bien maîtrisée peut, paradoxalement, améliorer la compatibilité mécanique à l'interface en permettant une meilleure répartition des contraintes. À l'inverse, une porosité excessive ou mal répartie peut provoquer une fragilisation du renforcement et une concentration des efforts, menaçant la durabilité du système renforcé.

Dans cette étude théorique, l'influence de plusieurs paramètres sur l'évolution des contraintes à l'interface entre une poutre en béton armé et une plaque composite poreuse de type FGM a été analysée. Les résultats obtenus montrent que la distribution de la porosité, l'épaisseur de la plaque, les modules d'Young du béton et de l'adhésif, ainsi que la longueur de la zone non renforcée, ont un impact significatif sur le comportement mécanique global. Il a été observé qu'une augmentation du taux de porosité et du coefficient de distribution améliore la compatibilité mécanique entre la plaque et le béton. À l'inverse, une diminution de la rigidité

du béton ou une dégradation de ses propriétés mécaniques entraîne une augmentation notable des contraintes d'interface, pouvant mener à un décollement ou à une rupture prématurée.

Ces résultats confirment l'intérêt de l'utilisation des plaques FGM poreuses dans le renforcement des structures en béton armé, à condition que la distribution de la porosité soit optimisée en fonction des exigences mécaniques et des contraintes d'exploitation. Par ailleurs, l'étude met en évidence l'importance de la prise en compte conjointe de la géométrie du renfort, des propriétés des matériaux et de la qualité de l'adhérence à l'interface.

En perspective, plusieurs pistes de recherche peuvent être envisagées pour enrichir ce travail. L'introduction de conditions aux limites plus complexes, comme les appuis élastiques ou les effets de chargements non uniformes, permettrait d'approcher davantage la réalité des structures. De plus, l'effet de la température et des gradients thermiques, souvent négligé, pourrait s'avérer déterminant dans les environnements soumis à des variations climatiques importantes. L'analyse de la fatigue, du comportement viscoélastique des adhésifs, ainsi que la prise en compte des effets dynamiques ou sismiques constituent également des prolongements pertinents.

Références bibliographiques

(IMdR, 2007) : Institut pour la Maîtrise des Risques Modélisation des dégradations des Structures et optimisation de leurs inspections. Projet n° P07-1.

(Guiraud. P, 2018, avril) : Prévention contre les phénomènes d'alcali-réaction. Info Ciments. Kreps, S. (n.d.). Pathologies des bétons. [Lecture notes]. Department of Civil Engineering, SEBAJU / Marine & Constances.

(Swenson.E. G, 1974) : Le béton en milieux sulfatés. Digeste de la construction au Canada.

(Djafar Henni.I, (2021-2022) : Pathologies et réhabilitation des structures (Polycopié). Université Hassiba Benbouali de Chlef.

(Tmaizeh. E, (2015-2016) : Pathologie de structures en béton armé (Mémoire de Master Académique, Université de Larbi Tébessi). Université de Larbi Tébessi.

(Sebsadji, S. K) : Pathologies des bétons. Département de Génie Civil.

(Adrien Lafond ,2021) : Tous savoirs sur les fissures des constructions.

(Guiraud. P, 2018, April) : Prévention des phénomènes de corrosion des armatures en acier dans le béton. InfoCiments. <https://www.infociments.fr/betons/prevention-des-phenomenes-de-corrosion-des-armatures-en-acier-dans-le-beton>.

(Bensalem. S, 2018) : Chapitre 2 : Principales pathologies des constructions.

(Ben Ahmed, A., & Bencherki, S, 2020) : Influence de la variation du taux de distribution de porosité sur les contraintes d'interface d'une poutre en béton renforcée par une plaque FGM (Mémoire de master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret).

(Adrien Lafond, 2021) : Tous savoirs sur les fissures des constructions.

(Pablo PEÑA ,2020) : Optimisation de l'EC2 pour la prédiction du fluage des bétons de granulats recyclés Université de Cergy-Pontoise, L2MGC, 5 Mail Gay Lussac- Neuville sur Oise- 95031 Cergy Pontoise Cedex.

(Guiraud.P, 2020, January) : Notions sur les retraits du béton. Info Ciments Retrieved from.

(Feldman.R. F, 1974, February): Changements de volume et fluage du béton. NRC Publications Archive. Retrieved from

(Chabbi, R., Ferhoune, N, & Bouabdallah, F, 2018, November 27-28): Pathologies, diagnostic à l'aide de CND et techniques de réparation et protection des ouvrages en béton armé : état de l'art. SIGC, Oran.

(Guiraud. P, 2019, juin) : Le mécanisme de carbonatation. InfoCiments.

(MURSEC, 2024) : Bâtiment en béton : problèmes d'humidité et solutions complètes.

(Le Bloa.G, 2023, février 10) : Renforcement de structures en béton - Évaluation de la résistance au cisaillement. Techniques de l'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr>

(Farsi, M.-N) : Réparation et/ou renforcement des ouvrages. Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (C.G.S.).

(Courard, L., & Michel, F2016) : Réparation des bétons : principes, matériaux et techniques. Université de Liège.

(Guiraud.P, 2017, février) : Réparation des désordres superficiels. INFOCUMENTS.

(Solutions- Béton, 2019). Le béton projeté : un matériau technique, performant et innovant. Solutions Béton [Revue électronique] , n° 13, pp. 22–25.

Editorial Team, 2024, 31 mai) : Techniques et avantages de renforcement par chemisage des poteaux. BibLus. <https://biblus.accasoftware.com/fr/techniques-et-avantages-de-renforcement-par-chemisage-des-poteaux>.

(Khalil Ibrahim Waked, 2003) : Les causes de l'effondrement des bâtiments : Méthodes de restauration et d'entretien, 3e édition.

(Solutions – Béton,2011). Les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton. Construction Moderne [Revue électronique], n° 134, pp. 36–41.

(Benzaid, R., Mesbah, H. A., & Chikh, N.-E. (2010) : Contribution à l'étude des matériaux composites dans le renforcement et la réparation des éléments structuraux linéaires en béton. Éditions Universitaires Européennes.

(Priestley, Seible. F et Calvi.G, 1996): “Seismic design and retrofit of bridges”, John Willey & Sons, Inc., New York, USA, 686 p.

(Rochidi.E. H,2004) :Contribution à l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton armé renforcées par matériaux composites (Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I). HAL.

(Meliani, M., Maziri, A., Mallil, H., & Echaabi.J,2015) : Matériaux composites pour le génie civil et la construction : Classification et comparaisons. 1er Congrès International sur les Ingénieries Civile, Mécanique et Electrique pour l'Énergie (CMEEE 2015), Marrakech, Maroc.

(Tossou.É, 2018) : Développement de nouveaux composites hybrides renforcés par des fibres de carbone et de lin : Mise en œuvre et caractérisation mécanique [Thèse de doctorat, Université de Caen Normandie]. HAL Open Science.

(Gornet .L ,2008) : Généralités sur les matériaux composites. École d'ingénieur, France.

(Benzaid, R., Mesbah, H. A., & Chikh, N.-E. (2010) : Contribution à l'étude des matériaux composites dans le renforcement ET la réparation des éléments structuraux linéaires en béton. Éditions Universitaires Européennes.

(Rabahi. Abderezak,2016) : Contribution à l'étude de l'efficacité des matériaux composites pour le renforcement et la réparation des structures en béton armé [Thèse de doctorat].

(Vizuete.J.M,2000): “Techniques et systèmes de renfort des structures en béton”, Proceedings of The Third ST Workshop, Session IV : Technology 2, Chamonix, 25-28 January 2000, edited by Laeger, H. and Prodon, S., pp.151-158.

(Chalot.A, 2020) : Renforcement de liaison dalles/voiles par PRF : application au renforcement parasismique (Doctoral dissertation, Université de Lyon). HAL Open Science.

(Sayed Ahmad.F, 2011) : Mise en précontrainte des Bétons Fibré à ultra haute performance (BFUHP) à l’aide de matériaux composites en carbone (PRFC) (Doctoral dissertation, Université Paris-Est). HAL Archives Ouvertes page 24.

(Vizuete.J.M,2000): “Techniques et systèmes de renfort des structures en béton”, Proceedings of The Third ST Workshop, Session IV : Technology 2, Chamonix, 25-28 January 2000, edited by Laeger, H. and Prodon, S., pp.151-158.

(Chatain.M, 2001) : “Matériaux composites : présentation générale”, AM 5 000, Technique de l’ingénieur, Traité Plastiques et Composites, Vol. AM 6.

(Boukhlef.F, 2020) : Proposition d’une nouvelle formulation mathématique pour l’analyse du comportement hydro thermo mécanique des structures fonctionnellement graduées (Thèse de doctorat, Université de La Rochelle & Université Djillali Liabès, Sidi Bel-Abbès, Algérie).

(Fahsi. A, 2018) : Analyse du flambement des plaques FGM sous différents chargements (Doctoral dissertation, Université Djillali Liabes - Sidi Bel Abbès).

(Bourada, F., Amara, K., Bourada, M., & Benyoucef, S, 2017): Effect of porosity on interfacial stresses in FG beams strengthened with composite laminates.

(Tounsi.A, (2005): “Improved theoretical solution for interfacial stresses in concrete beams strengthened with FRP plate” International Journal of Solids and Structures.

(Chergui. S, 2020) : Comportement des poutres en béton armé renforcées par des plaques composites [Thèse de doctorat, Université Hassiba Benbouali de Chlef].