



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

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

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

**YAGOUB CHAHRAZED**

*Sujet du mémoire*

**RENFORCEMENT EN CISAILLEMENT DES POUTRES EN  
BETON ARME A L'AIDE DES MATERIAUX COMPOSITES  
AVANCES**

Soutenu publiquement le 14 juillet 2021 devant le jury composé de :

Mr H.H. ABDELAZIZ

Président

Mr R. BENFERHAT

Rapporteur

Mr M. AIT AMAR MEZIANE

Examineur

Mr K. BOUAKKAZ

Examineur

Promotion 2020/2021

## *Remerciements*

*Je remercie Dieu de m'avoir donné la force et la foi pour terminer ce travail.*

*D'abord, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon encadreur Monsieur Benferhat Rabia qui m'a donné la force, la volonté et le suivi pour faire ce travail. Je tiens à lui exprimer ma gratitude, mon respect et mon appréciation pour ce qu'il a fait.*

*Je remercie le jury d'avoir pris la peine pour venir honorer le jury de ma soutenance.*

*Mes remerciements particuliers à mes parents, ma famille et à tous mes collègues qui m'ont encouragé à réaliser ce travail.*

## *Dédicaces*

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur  
tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,  
A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours  
universitaire,  
Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et  
le fruit de votre soutien infailible,  
Merci d'être toujours là pour moi.*

# Résumé

Le renforcement des structures en béton armé représente un moyen avantageux de prolongement de leur durée de vie. En effet, il est souvent beaucoup moins onéreux de renforcer certains éléments structuraux que d'effectuer une reconstruction complète de l'ouvrage. Plusieurs techniques de renforcement sont disponibles, nous citons celles qui consistent au renforcement externe au moyen des matériaux composites.

Une étude analytique sur le renforcement en cisaillement des poutres en béton armé renforcées par des matériaux composites avancés a été menée dans ce travail. Deux modèles analytiques basés sur le règlement BAEL et l'analogie de Morsch sont présentés pour déterminer la contribution des plaques composite. L'influence des paramètres qui jouent un rôle important dans le renforcement au cisaillement sont également étudiés dans ce mémoire.

Les résultats des deux présentes modèles traduisent un comportement similaire à ceux enregistrés par d'autres modèles qui se trouvent dans la littérature. Cette étude analytique a montré que la réparation par matériaux FGM améliore les performances mécaniques des poutres en béton armé en termes de la résistance en cisaillement. Cette résistance devient plus faible avec l'augmentation de l'indice de puissance.

**Mots-clés :** Poutre en BA, Renforcement en cisaillement, matériaux composites, FGM.

# Abstract

The reinforcement of RC structures represents an advantageous means of prolonging their service life. Indeed, it is often much less expensive to reinforce certain structural elements than to carry out a complete reconstruction of the structure. Several reinforcement techniques are available, we cite those which consist of external reinforcement by means of composite materials.

An analytical study on the shear reinforcement of reinforced concrete beams reinforced with advanced composite materials was carried out in this work. Two analytical models based on the BAEL code and the Morch analogy is presented to determine the contribution of composite plates. The influences of parameters which play an important role in shear reinforcement are also studied in this study.

The results of the two present models reflect a behavior similar to those recorded by other models found in the literature. This analytical study showed that repairing with FGM materials improves the mechanical performance of reinforced concrete beams in terms of shear strength. This resistance becomes weaker with the increase in the power law index.

**Keywords:** Concrete beam, Shear reinforcement, composite materials, FGM

## ملخص

يعتبر تعزيز الهياكل الخرسانية المسلحة وسيلة مفيدة لإطالة عمر خدمتها، و غالبا ما تكون تقوية بعض العناصر الهيكلية اقل تكلفة من اعادة بناء الهيكل بالكامل، هناك العديد من تقنيات التعزيز المتوفرة نذكر منها التعزيز الخارجي عن طريق المواد المركبة.

تم في هذا العمل إجراء دراسة تحليلية عن تقوية القص في الخرسانة المسلحة المقواة بالمواد المركبة . تم تقديم نموذجين تحليليين يعتمدان على قانون BAEL و نظرية Mörsh لتحديد مساهمة الالواح المركبة. في هذه الاطروحة تم ايضا دراسة تأثير العوامل التي تلعب دورا مهما في تعزيز القص. تعكس نتائج النموذجين الحاليين سلوكا مشابها لتلك التي سجلتها النماذج الأخرى الموجودة في الدراسات السابقة حيث اظهرت هذه الدراسة التحليلية ان الإصلاح بالمواد متدرجة الخصائص يحسن من الأداء الميكانيكي لعوارض الخرسانة المسلحة من حيث قوة القص. هذه المقاومة تصبح أضعف بزيادة مؤشر القوة.

الكلمات المفتاحية: عارضة من الاسمنت المسلح، تدعيم القص ، مواد مركبة ،المواد متدرجة الخصائص.

# Tables des matières

Résumé .....	i
Abstract.....	ii
ملخص.....	iii
Tables des matières.....	iv
Liste des figures.....	xii
Liste des tableaux .....	xv
Liste des notations et abréviations.....	xv
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>

## CHQPITRE I

### LES PATHOLOGIE DESSTRUCTURES EN BETON ARME

I.1. Introduction : .....	3
I.2. Dégradations des ouvrages dues au vieillissement: .....	3
I.3. Les causes physiques de dégradation: .....	4
I.3.1. Abrasion: .....	4
I.3.1.1. Sources et mécanique de l'abrasion du béton : .....	4
I.3.2. Erosion: .....	5
I.3.2.1. La définition d'érosion : .....	5
I.3.2.2. Influences sur l'érosion du béton dans la pratique: .....	5
I.3.2.3. Evaluation du risque pour l'érosion du béton: .....	6
I.3.3. La cavitation : .....	6
I.3.4. Le feu : .....	7
I.3.5. Cycle gel/dégel : .....	7

I.3.5.1. La définition de cycle gel/dégel :	7
I.3.5.2. Les deux principaux du cycle gel-dégel:	7
I.3.5.3. Les mécanismes développés par le gel:	7
I.3.5.4. Action des Cycles gel/dégel:	7
I.3.5.5. Les effets constatés sont de deux types:	8
I.3.6. Chocs:	8
I.3.6.1. Définition.	8
I.3.7. Hautes températures :	8
I.3.7.1. Transformation de béton expose au feu :	9
I.4. Les causes chimiques de dégradation:	10
I.4.1. Les dégradations par agression chimique:	10
I.4.2. Alkali-rection ou cancer du béton:	10
I.4.2.1. La réaction alcali-silice:	11
I.4.3. Rection sulfatique :	11
I.4.3.1. Les principaux paramètres de réaction sulfatique interne (RSI):	12
I.4.4. Les sulfate:	12
I.4.4. La corrosion:	13
I.4.4.1. Définition de la corrosion :	13
I.4.4.2. Les facteurs influant sur la corrosion des armatures:	13
I.4.4.3. Le mécanisme comprend deux phases.	13
1.4.4.4. Les types de corrosion:	15
I.5. Les autres causes de dégradation des bétons:	16
I.5.1. Mauvais positionnement des armatures :	16
I.5.2. Mauvaise disposition des armatures :	16
I.5.3. Mauvaise qualité des bétons employés :	16
I.5.4. Vibration trop important :	16



I.5.5. Cycle humidité / sècheresse :	16
I.5.6. Cas particulier de l'action de l'eau de mer :	17
I.6. Les outils d'analyse:	17
I.6.1. Le scléromètre:	17
I.6.2. Le Ferroscan:	18
I.6.3. L'auscultation par ultrasons:	18
I.6.4. Le millivoltmètre:	18
I.6.5. Carottage:	18
I.7. Conclusion:	19

## **CHAPIRE II**

### **LES PRINCIPALES TECHENIQUES DE REPQRQTION ET DE RENFORCEMENT**

II.1. Introduction :	20
II.2. Adjonction d'armatures complémentaires:	20
II.2.1. Mise en place des armatures complémentaires:	21
II.2.2. Protection des armatures:	21
II.3. Projection du béton:	24
II.3.1. Introduction:	24
II.3.2. Technique de protection du béton:	25
II.3.3. Description des deux méthodes:	26
II.3.4. Projection par voie sèche (avec ou sans pré-mouillage):	26
II.3.5. Projection par voie mouillée:	26
II.3.6. Mise en œuvre du béton projeté:	27
II.4. Chemisage en béton armé:	29
II.4.1. L'adhérence béton-acier:	30
II.4.1.1. Définitio de l'adhérence béton-acier	30

II.4.1.2. Le rôle de l'adhérence:.....	30
II.4.1.3. Expérience du « pull-out ». ....	31
II.4.3. Avantages et inconvénients du chemisage en béton armé:.....	32
II.5. Renforcement par gainage métallique : .....	33
II.5.1. Introduction:.....	33
II.5.2. Les matériaux utilisés : .....	33
II.5.3. La mise en œuvre des plats collés:.....	33
II.6. Le renforcement au moyen de profilés métalliques:.....	34
II.7. Renforcement par précontrainte additionnelle:.....	35
II.7.1. Les différents tracés de la précontrainte additionnelle: .....	37
II.8. Renforcement par matériaux composites:.....	37
II.8.1. Technique de renforcement: .....	39
II.8.2. Les applications des FRP en génie civil: .....	40
II.9. Le renforcement des poutres à l'aide du matériau composite: .....	40
II.10. Conclusion et choix de la méthode de renforcement: .....	41

### **CHAPITRES III**

#### **MATERIAUX COMPOSITES CLASSIQUES ET AVANCES**

III.1. Introduction: .....	42
III.1.2. Définition :.....	42
III.1.3. L'intérêt des composites: .....	43
III.1.4. Les constituants : .....	44
III.2. Les caractéristiques générales .....	44
III.2.1. Les propriétés des matériaux composites résultent en: .....	45
III.3. Les matrices:.....	45
III.4. Les résines : .....	46

III.4.1. Différents types de résines :.....	47
III.5. Les charges et les additifs :.....	48
III.5.1. Principales charges et principaux additifs utilisés:.....	49
III.5.2. Certains produits peuvent combiner les deux fonctions.....	49
III.6. Les fibres: .....	50
III.6.1. Définition:.....	50
III.7. Classification des matériaux composites:.....	53
III.7.1. Classification suivant la forme des constituants:.....	53
III.7.1.1. Introduction: .....	53
III.7.1.2. Les composites à fibres: .....	53
III.7.1.3. Les composites à particules: .....	53
III.7.2. Classification suivant la nature des constituants: .....	54
III.7.2.1. composites à matrice organique avec : .....	54
III.7.2.2. Composites à matrice métallique avec : .....	54
III.7.2.3. Composites à matrice minérale avec : .....	54
III.8. Connaissance des technologies des matériaux avancées FGM: .....	54
III.8.1. Généralité: .....	54
III.8.1.1. Introduction: .....	54
III.9. Domaines d'applications des matériaux fonctionnellement gradués: .....	56
III.10. Comparaison des matériaux types FGM et les matériaux composites classiques:...	57
III.11. Lois régissant la variation des propriétés matérielles des FGM: .....	58
III.11.1. Propriétés matérielles de la plaque P-FGM:.....	60
III.11.2. Propriétés matérielles de la plaque S-FGM:.....	61
III.11.3. Les propriétés matérielles de la poutre E-FGM : .....	62
III.12. Conclusion: .....	62

## **CHAPITRE IV:**

## **RENFORCEMENT EN CISAILLEMENT DES POUTRES EN BA PAR MATERIAUX COMPOSITES**

IV.1. Introduction: .....	63
IV.2. Calcul de la contribution des plaques composites en cisaillement:.....	64
IV.2.1. Modèles théoriques existants: .....	64
IV.2.1.1. Modèle de Triantafillou:.....	64
IV.2.1.2. Modèle de Chen et Teng: .....	64
IV.2.1.3. Modèle de Carolin et Täljsten (2005) et Sas et al. (2008):.....	66
IV.2.2. Détermination de la contribution des plaques composites en cisaillement basant sur code BAEL: .....	67
IV.2.2.1. Justification des poutres renforcées sous sollicitation tangentes: .....	68
IV.2.3. Détermination de la contribution des plaques composites en cisaillement basant sur l'analogie de Morsch :.....	69
IV.2.3.1. Équilibre des forces :.....	70
IV.2.3.2. Vérification de la traction dans les bandes :.....	70
IV.3. La plaque composite de renforcement: .....	71
IV.4. Résultats et discussions: .....	72
IV.5. Conclusion :.....	87
<b>Conclusions générales: .....</b>	<b>88</b>
<b>Références bibliographiques: .....</b>	<b>89</b>

# Liste des figures

## Chapitre I

Figure I.1: Séquence d'abrasion de la surface du béton dans les structures hydrauliques (a) étape initiale. Surface du béton sous l'action abrasive, c) perte d'agrégat grossier et de mortier du béton surfacer du béton .....	5
Figure I.2: Effet du gel-dégel sur le béton : écaillage du béton d'enrobage et corrosion des armatures .....	8
Figure I.3: Tunnel sous la manche en phase de réparation à la suite de l'incendie septembre 2008.....	9
Figure I.4: Le facies le plus fréquent est la fissuration en réseau .....	11
Figure I.5: La réaction sulfatique interne .....	12
Figure I.6: Processus de corrosion .....	14
Figure I.7: Déformation du béton autour de l'acier, après formation de fissures internes .....	14
Figure I.8: Avancement du front de dé passivation en fonction du temps.....	
Figure I.9 Type de corrosion dans le béton : uniforme (carbonatation), localisée (chlorure).....	15
Figure I.10: Le scléromètre.....	17
Figure I.11: Appareil d'auscultation par ultrasons.....	18
Figure I.12: La Carotteuse.....	19

Figure 1.15: Causes de dégradation des structures en béton

## Chapitre II

Figure II.1: Réparation de poutre par adjonction d'armature.....	21
Figure II.2: Principe de la protection cathodique des armatures dans le béton.....	23
Figure II.3: Renforcement d'une poutre par adjonction d'armatures additionnelles en sa Partie inférieure.....	24
Figure II.4: Renforcement d'une poutre au moyen de béton projet.....	25
Figure II.5: Renforcement d'une poutre au moyen de béton projeté.....	25

Figure II.6: Projection par voie sèche.....	28
Figure II.7: Projection par voie humide.....	28
Figure II.8: L'application correcte et incorrecte de l'enveloppement des bars par le béton projeté.....	29
Figure II.9: Chemisage en béton armé.....	29
Figure II.10: Chemisage en béton armé.....	30
Figure II.11: Scellement de la barre dans le béton.....	30
Figure II.12: Distribution de la fissuration.....	31
Figure II.13: Essai du (pull-out).....	31
Figure II.14: Diagramme du glissement.....	31
Figure II.15: Organigramme du processus de chemisage en béton armé.....	32
Figure II.16: Différents étapes renforcement d'un poteau par gainage métallique.....	34
Figure II.17: Renforcement de poteaux au moyen de profilés métallique.....	35
Figure II.18: Effets d'une précontrainte additionnelle.....	36
Figure II.19: Le tracé rectiligne.....	37
Figure II.20: La trace polygonale.....	37
Figure II.21: Composants d'un matériau composites.....	38
Figure II.22: Types de barres composites (FRP) insérées avec la technique NSM.....	39
Figure II.23: Chemisage d'un poteau par PRFC.....	39
Figure II.24: Renforcement par une lamelle en PRF d'une poutre.....	40
Figure II.25 : Poutres en BA renforcées par matériaux composites.....	40

### **Chapitre III**

Figure III.1: Principaux renforcement-Tôle d'acier et bande de PRF (lamelles).....	42
Figure III.2: Composition d'un matériau composite. ....	43
Figure III.3: Représentation schématique d'un matériau composite de type particule.....	43
Figure III.4: Matériau composites.....	44
Figure III.5: Les différents types de composites.....	45
Figure III.6: Organigramme des différentes familles de matrice.....	46
Figure III.7: Structure moléculaire tridimensionnelle.....	47
Figure III.8: Composition d'une résine polyester.....	47
Figure III.9: Tissus de renfort.....	50

Figure III.10: Organigramme des différentes familles de fibres.....	50
Figure III.11: Fibres de verres.....	51
Figure III.12: Fibre de carbone.....	51
Figure III.13: Les Fibre d'aramide.....	52
Figure III.14: Fibre céramique.....	52
Figure III.15: Fibres de basalte.....	53
Figure III.16: Variation continue des propriétés et de la microstructure (schématisée)...	55
Figure III.17: Matériaux a gradient fonctionnel avec des fractions volumiques des phases constitutives graduées.....	55
Figure III.18: Les principaux domaines d'application des FGM.....	57
Figure III.19: Le rôle de l'interface sur la ténacité des composites.....	57
Figure III.20: La distribution des composants des matériaux.....	58
Figure III.21: Géométrie d'une plaque FGM.....	59
Figure III.22: Variation de la fraction volumique à travers l'épaisseur P-FGM.....	60
Figure III.23: Variation de la fraction volumique à travers l'épaisseur (S-FGM).....	61
Figure III.24: Variation du module de Young à travers l'épaisseur (E-FGM).....	62

## Chapitre IV

Figure IV.1 Géométrie d'une section transversale d'une poutre en béton armée renforcée en cisaillement par des plaques composites .....	67
Figure IV.2 : Géométrie d'une section transversale d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par des armatures transversales et des plaques composites.....	68
Figure IV.3 : Analogie d'une poutre renforcée à un treillis équivalent.....	69
Figure IV.4: Analogie des poutres renforcées avec des bandes en différentes inclinaisons ...	70
Figure IV.5: Poutre renforcée transversalement par des plaques composite.....	70
Figure IV.6 : Coupe d'une plaque composite .....	70
Figure IV.7 : Géométrie d'une poutre en béton armé renforcée transversalement par des plaques composites .....	72

Figure IV.8: Effet de l'espacement des plaques sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par des plaques en composite FGM en Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	81
Figure IV.9 : Effet de l'espacement des plaques sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par des plaques en composite FGM en Al/ZrO <sub>2</sub> .....	81
Figure IV.10 : Effet de la hauteur des bandes sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM en Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	82
Figure IV.11 : Effet de la hauteur des bandes sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM en Al/ZrO <sub>2</sub> .....	82
Figure IV.12 : Effet de l'angle téta d'inclinaison des plaques de renforcementsur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM en Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	83
Figure IV.13: Effet de l'angle téta d'inclinaison des plaques de renforcementsur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM Al/ZrO <sub>2</sub> .....	83
Figure IV.14 : Effet de la largeur des plaques sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	84
Figure IV.15 : Effet de la largeur des plaques sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM Al/ZrO <sub>2</sub> .....	84
Figure IV.16 : Effet des porosités sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	85
Figure IV.17 : Effet des porosités sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM Al/ZrO <sub>2</sub> .....	85
Figure IV.18 : Effet de l'indice de puissance sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	86
Figure IV.19 : Effet de l'indice de puissance sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM Al/ZrO <sub>2</sub> .....	86





# Liste des tableaux

## Chapitre I

Tableau I-1: Variations de température Sous l'effet des variations de température.....	9
--	---

## Chapitre II

Tableau II.1: Comparaison des caractéristiques générales des produits de protection.....	23
--	----

## Chapitre III

Tableau III.1: Caractéristiques des matériaux composites FGM en comparaison avec les matériaux composites conventionnels.....	58
---	----

## Chapitre IV

Tableau IV.1: les différents types des porosités.....	72
Tableau IV.2: Caractéristiques et propriétés mécanique des matériaux utilisées.....	73
Tableau IV.3: Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement.....	74
Tableau IV.4: Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement.....	75
Tableau IV.5: Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement.....	75
Tableau IV.6: Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement.....	76
Tableau IV.7: Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement.....	77
Tableau IV.8 : Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement.....	77
Tableau IV.9 : Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement.....	78
Tableau IV.10: Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement.....	78
Tableau IV.11: Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement.....	79
Tableau IV.12: Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement.....	79

# Liste des notations et abréviations

## Notations:

$f_c$ : Résistance caractéristique du béton.

$\sigma_c$  : Contrainte d'élasticité limite des armatures tendus

E: Module d'élasticité de l'acier

$A_s$ : Section des armatures tendus.

$A_{frp}$ : Section du composite.

$\sigma_{FRP}$  : Contrainte limite du composite,

$E_{frp}$ : Module d'élasticité du composite.

$\varepsilon_{frp}$  : Déformation du composite.

$T_{frp}$  : Contribution du composite à l'effort tranchant.

T: Contribution des étriers

$D_{frp}$ : Hauteur du composite sur la section transversale.

$S_{frp}$ : Espacement entre les bandes en composite.

$t_{frp}$ : L'épaisseur des plaques de renfort

$E_c$ : Module de young de la céramique

$V_c$ : Fraction volumique du céramique

$E_m$  : Module de young du métal

$V_m$  : Fraction volumique du métal

K: l'indice de puissance

$b_{FGM}$  : largeur des plaques composites de renfort

$\theta$  : L'angle d'inclinaison des plaques de renforcement

$S_{FGM}$ ; l'espacement des plaques

$\alpha$ : porosité

**Abréviations :**

FRP: Fiber reinforced polymer

FGM: Matériaux à gradient fonctionnel

BAEL : Béton armée a état limite

# **Introduction générale**

## **Introduction générale:**

Dans le domaine de la construction, le béton armé est le matériau le plus couramment utilisé pour la construction de bâtiments, de ponts, etc.

Avec sa longue histoire, un grand nombre de structures se sont avérées dégradées pour diverses raisons, telles que les accidents de la route, les tendances de la circulation, les changements de charge des bâtiments ou les effets climatiques. Les structures en béton armé peuvent être endommagées en raison du vieillissement des matériaux ou des modifications des conditions d'exploitation au cours de leur durée de vie.

La durabilité est la capacité d'une entité à exécuter des fonctions dans des conditions d'utilisation et de maintenance données jusqu'à ce qu'elle atteigne un état limite. Une enquête menée par le CTTP en 2003 a montré que 44% des ouvrages d'art présentent des obstacles qui nécessitent un renforcement. Après le séisme du 21 mai 2003, 86 106 bâtiments ont été endommagés dans la seule province d'Alger. Cela indique que le nombre de structures à réparer est important.

Afin de résoudre ces problèmes, le propriétaire a deux possibilités principales : la reconstruction ou la réparation.

La reconstruction est une solution intéressante, mais elle est très coûteuse et ne peut s'appliquer à toutes les structures (structures historiques, etc.). Par conséquent, la deuxième solution est généralement utilisée pour maintenir la structure en bon état de fonctionnement.

Une des méthodes de réparation couramment utilisée, la technique de renforcement externe de structure en béton armé est une technique utilisée pour réhabiliter ou augmenter la résistance des structures en béton armé (BA) lorsque celles-ci présentent des dégradations de matériaux, des défauts de conception ou bien exécution ou lorsque le chargement actuel demande une structure plus résistante pour la sécurité. Le principe de cette technique est le remplacement des matériaux dégradés et/ou l'ajout de nouveaux matériaux, d'utiliser des matériaux beaucoup plus performants que la section de structure initiale, d'augmenter la section de structure par l'ajout de matériau (béton...). La technique a recours le plus souvent à l'utilisation des aciers en tant que renforts externes passifs ou actifs qui présentent des avantages comme une haute performance mais présentent aussi des inconvénients : corrosion, poids élevé, adaptation difficile vis-à-vis des sections complexes de structure. C'est pourquoi

l'utilisation de matériaux composites devient un moyen intéressant en remplacement de l'acier dans le renforcement des structures en béton armé. Ces matériaux présentent un bon potentiel de facilité d'adaptation à n'importe quelle section de structure donc une mise en œuvre très facile grâce à leur faible poids, leur haute performance en traction, anticorrosion.

L'objectif principal de ce travail est de déterminer la contribution des plaques composites en cisaillement pour des poutres en béton armé renforcées par le collage externe des plaques en matériaux composites avancés. Les paramètres d'études sont la classe de béton et la configuration de renforcement en cisaillement.

Cette mémoire est constituée de deux parties :

La première partie constitue une synthèse bibliographique sur les causes de dégradation des constructions en béton armé, les techniques de renforcement et de réparation des structures en béton armé ainsi que des généralités sur les matériaux composites classiques et avancés.

La deuxième partie est totalement dédiée à l'étude analytique. Les deux modèles analytiques qui permettent la détermination de la contribution des plaques composites en cisaillement sont présentés dans ce chapitre. Les résultats analytiques en termes numériques et graphiques obtenus dans le cadre de cette étude et leurs discussions seront présentés.

Enfin, ce travail est terminé par une conclusion générale où sont rappelées les principales résultats obtenus.

Chapitre I:  
Les pathologies des  
structures en béton armé



### **I.1. Introduction :**

La durabilité des ouvrages dépend de leur comportement face aux conditions climatiques et environnementales qui existent dans les milieux où ils sont construits. La dégradation d'une structure en béton armé est la traduction d'une évolution lente et irréversible de ses variables d'état, conduisant à la diminution des marges nécessaires de sûreté pour assurer son bon fonctionnement. Il est intéressant de connaître quelques chiffres à propos de l'état d'ouvrages. En France, une estimation sommaire a permis d'évaluer à plus de 65 000 le nombre d'ouvrages d'art de plus de 5 m de portée dont la moitié nécessite un renforcement ou une réparation. L'ensemble du patrimoine français représentait, en 1997, une surface de 2 600 millions de m<sup>2</sup> de plancher, avec 1 500 millions de m<sup>2</sup> pour le secteur résidentiel qui a été construit dans les années 1970 à 1975 et arrive à un âge critique (Perret 1998). Selon le Ministère de l'Équipement des transports et des logements, la surveillance et l'entretien des ouvrages en France représentent plus de 500 millions d'euros par an (Ferrier 1999). Une Enquête du SETRA (1995) (Service d'études techniques des routes et autoroutes) montre que 16% des ouvrages présentent des désordres qui nécessitent des travaux de réparation, 37 % exigent un entretien spécialisé urgent. Aux États Unis, 21 Chapitre I pays où l'infrastructure routière dépasse les 70 000 kilomètres, le Département des Transports estime les dépenses pour le maintien de l'infrastructure routière à 50 milliards de dollars par an (Mosallam et al. 2003). Depuis le début des années 80, des programmes d'évaluation et des inventaires ont été lancés partout dans le monde et les résultats indiquent toujours que l'état d'ouvrages est inquiétant. Avant de procéder à toute réparation, il est indispensable de procéder à un diagnostic et de rechercher les causes des dégradations lorsque celles-ci n'apparaissent pas de façon évidente. L'objet du présent paragraphe est de dresser un panorama de l'essentiel des dégradations des ouvrages en béton armé qui sont généralement dues à des erreurs de conception, à des modifications de conditions d'exploitation, au vieillissement des matériaux ou à des causes accidentelles ; celles qui menacent la durabilité, la résistance et la stabilité des ouvrages et peuvent entraîner leur dégradation, leur ruine.

### **I.2. Dégradations des ouvrages dues au vieillissement:**

Les propriétés physiques et, plus particulièrement, le comportement mécanique du béton et des aciers sont susceptibles de se dégrader en fonction des conditions d'environnement définies par la localisation géographique de l'ouvrage. Les principales causes de vieillissement sont liées aux phénomènes suivants (Amjad. K .2012).

### **I.3. Les causes physiques de dégradation:**

Par dégradations physiques, on entend l'ensemble des causes qui peuvent provoquer l'éclatement du béton comme, par exemple la cristallisation saline, l'érosion, l'exposition répétée à des cycles gel-dégel, le retrait, l'usure, les phénomènes thermiques, y compris les incendies (Dominique.B.2020).

#### **I.3.1. Abrasion:**

Le phénomène d'abrasion est due généralement à :

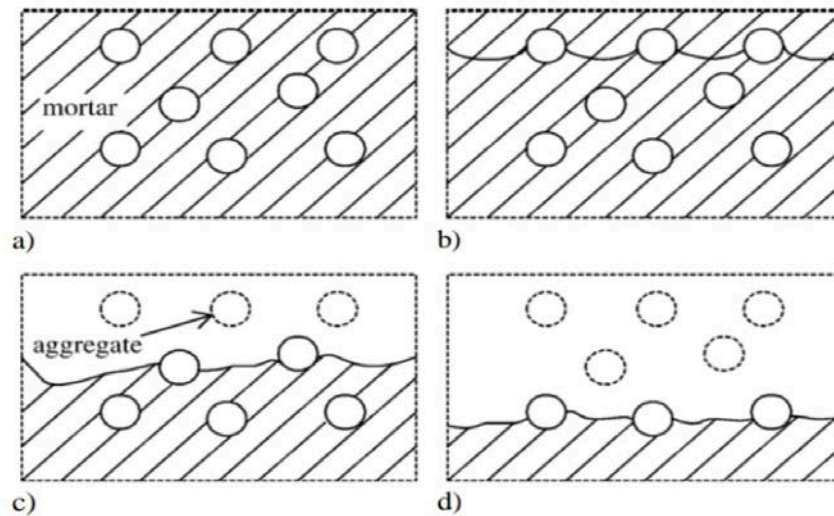
- Une circulation intense de l'eau (barrages).
- Les charges mécaniques répétées (chaussées, dallage industriel).
- L'action du courant d'eau sur corps immergés ou flottants (piles de ponts, plate, forme, etc.) (Amjad.K.2012).

Plus clairement l'abrasion c'est l'usure accompagnée d'une perte de matière consécutive au frottement d'un élément par un abrasif ou par le passage répétitif des piétons, véhicules et chariots industriels, etc.,. En d'autres termes, Usure produite par le frottement de particules entre-elles ou entre deux surfaces dont au moins l'une est abrasive. Le vent ou l'eau et les particules qu'elle contient sont à l'origine de phénomènes d'érosions du même principe que l'abrasion (David.A . 2016).

##### **I.3.1.1. Sources et mécanique de l'abrasion du béton :**

Définit quatre manières par lesquelles l'abrasion Pourrait être imposée sur une surface en béton; sur sols en béton dus à la circulation humaine, usure due à ta circulation des véhicules avec pneus cloutés et pneu de rangement chaînes, matières abrasives dans l'eau affectant les structures hydraulique telles que les déversoirs de barrage, et vitesses de l'eau créant une cavitation à la surface du béton. La majorité des études entreprises se sont concentrés sur trois premières formes d'abrasion. Avec un intérêt particulier pour les structures hydrauliques. Liu et coll. a décrit le processus chronologique d'abrasion du béton avec du sable aqueux une surface de béton vierge est d'abord soumise à un perchage pré abrasion, révélant lentement le substrat le substrat sous. La gravité de cet impact est liée à la vitesse d'écoulement et à la pression hydraulique du L'eau. Ensuite, l'impact de particules solides (telles que le sable de l'eau) sur la surface entraîne une interface fissuration entre les constituants du béton,' l'étendue de cette fissuration est régie par la taille de là impactant les particules. Enfin, l'action d'érosion abrasive se produit sur la surface du béton: c'est lié à la vitesse et à la dureté des particules

dans l'eau, en plus de la force d'adhérence des constituants du béton L'usure hydraulique du béton peuvent être décrite comme un processus cyclique fissures.



**Figure I.1:** Séquence d'abrasion de la surface du béton dans les structures hydrauliques (a) étape initiale. Surface du béton sous l'action abrasive, c) perte d'agrégat grossier et de mortier du béton surfacer du béton (Benjamin.D et Md.Safiuddin. 2015).

### I.3.2. Erosion:

#### I.3.2.1. La définition d'érosion :

Perte de matière résultant du frottement d'un corps solide et d'un fluide contenant des particules solides en suspension et en mouvement (Ndzana.A et Tchoumi.S.2007). Influence des processus biologiques et du choix des procédés. L'érosion du béton est bien plus importante dans les bassins biologiques aérés avec nitrification que dans les bassins anoxiques dénitrification. Les installations possédant des eaux usées riches en ammoniacque sans section de dénitrification présente l'érosion du béton la plus importante en raison du taux de nitrification de la citadelle existant dans le quart aéré. Dans le cadre de la planification d'une S TEP, le choix des procédés peut influencer le risque de survenance de l'érosion du béton:

- Le phénomène survient le moins souvent dans les installations à boues activées avec dénitrification optimisée.
- Les installations à lit fixe à taux volumique élevé et avec nitrification seulement sont les plus touchées par l'érosion du béton.

#### I.3.2.2. Influences sur l'érosion du béton dans la pratique:

A) L'érosion du béton est accentuée par la sollicitation mécanique de la surface. Le nettoyage intensif et régulier par jet d'eau haute pression accélère l'usure de la couche protectrice de calcites. Il convient si viable de proscrire cette technique si l'on souhaite

empêcher l'érosion du béton. Les procédures requérant une sollicitation mécanique augmenter (par exemple le procédé à lit fixe avec billes en polystyrène) peuvent entraîner une sollicitation mécanique augmenter et augmenter en conséquence le phénomène d'érosion du béton.

B) La résistance à l'érosion peut être augmentée par le choix technologique du béton Un important dépôt d'hydroxyde de calcium  $\text{Ca(OH)}_2$  dans le béton entraîne une capacité tampon élevée. Cette dernière peut être optimisée par le choix d'un ciment, d'un adjuvant pour béton et d'un taux de ciment adéquats. Un rapport e/c profond condense et ralentit généralement la diffusion et donc le processus d'érosion également.

### **I.3.2.3. Evaluation du risque pour l'érosion du béton:**

Des plages de risque, pour lesquelles les conditions relatives à la dureté des eaux usées, aux processus biologiques de transformation d'azote (nitrification/ dénitrification) et à la sollicitation liée au procédé sont déterminantes, ont été définies compte tenu des expériences réalisées jusqu'alors. L'appréciation des grandeurs d'influence représentée à l'illustration 02 mentionne certains facteurs de risque devant être pris en compte dans le cadre d'une planification (ARA. Bericht.f.2010).

### **I.3.3. La cavitation :**

La cavitation est la formation de cavités constituées d'un mélange de gaz (incondensable) et de vapeur dans un liquide sous une faible pression. Des bulles de cavitation peuvent être créées autant par la germinations de nouvelles cavités que l'augmentation en taille de cavités préexistantes. Ces cavités préexistantes sont connues sous le nom de germes de cavitation et leur effet sur la cavitation est présenté dans l'annexe A. La cavitation est catégorisée selon la cause de dépressurisation : une tension, ou un dépôt d'énergie localisé. Il existe quatre manières de créer de la cavitation :

1) La cavitation hydrodynamique, provoquée par la baisse de pression dans un liquide en écoulement;

2) La cavitation acoustique, provoquée par la variation de pression d'ondes acoustiques dans un flux au repos ;

3) La cavitation optique, provoquée par des photons ;

4) La cavitation par particules, provoquée par des particules élémentaires, tel un muon. (Taillon.G.2016).

#### **I.3.4. Le feu :**

Les très fortes élévations de température lors d'un incendie par exemple, entraînent un éclatement du béton ( Ndzana.A et Tchoumi S.2007).

#### **I.3.5. Cycle gel/dégel :**

##### **I.3.5.1. La définition de cycle gel/dégel :**

Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de montagne, des chambres froides. . (Ndzana.A et Tchoumi.S. 2007), Les dégradations dues aux cycles de gel-dégel affectent principalement les parties non protégées par un revêtement étanche et sont amplifiées par l'utilisation de sels anti verglas. Les symptômes les plus courants sont l'écaillage de surface et le gonflement de tout ou partie de la structure accompagné le plus souvent d'une fissuration en réseau. L'intensité des dégradations dépend, évidemment, de la plus ou moins grande porosité du béton et de son degré de saturation. Quant aux sels anti verglas, ils peuvent provoquer une microfissuration résultant de la chute brutale de température du matériau lorsque fond la couche de glace par suite de la pénétration des ions chlorures, et déclencher la corrosion des armatures. La gélivité des granulats a aussi une influence sur la résistance des bétons aux basses températures. Il semble qu'il existe une dimension critique des granulats au-delà de laquelle les pressions hydrauliques provoquées par le gel et l'expulsion de l'eau de leurs pores dépassent leur résistance mécanique (Jean.et Calgaro.R.1999).

##### **I.3.5.2. Les deux principaux du cycle gel-dégel:**

- Une fissuration répartie dans la masse du béton (gel interne)
- Un délitage, écaillage de surface (gradient thermique).

##### **I.3.5.3. Les mécanismes développés par le gel:**

- Origine de cycles gels/dégels
- Brusque chute de température
- Action sels de déverglaçage.

##### **I.3.5.4. Action des Cycles gel/dégel:**

- La croissance du volume d'eau englace de 9% n'est pas responsable
- Ce sont les pressions de l'eau vers front froid la cause principale plus.
- Les pathologies du béton Dégradations liées à l'environnement :

### **I.3.5.5. Les effets constatés sont de deux types:**

- Eclatements consécutifs au gel à cœur du béton,
- Ecaillage du béton par à proximité de la surface.

### **I.3.6. Chocs:**

**I.3.6.1. Définition :** Le béton éclate sous l'effet de chocs produits par des engins de transport ou de levage, des outils. ( Ndzana. A Grégoire & Tchoumi S / 2007). Le béton est susceptible de s'épaufrer quand il est soumis à des ondes de choc. Ceci est dû aux différentes vitesses de propagation des ondes dans les différents matériaux (les agrégats, le liant et les armatures La résistance aux chocs peut être améliorée par l'emploi pour la confection du béton, d'agrégats anguleux et rugueux et par l'utilisation de sections fortement armées (Ghobrin.i M. Amina./2018).



**Figure I.2 :** Effet du gel-dégel sur le béton : écaillage du béton d'enrobage et corrosion des armatures (Boutaraa.Z.2019)

Le phénomène de choc peut provenir de:

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

### **I.3.7. Hautes températures :**

La tenue au feu des matériaux cimentaires (mortier, béton) dépend de sa formulation, de ces caractéristiques physico-mécaniques et des conditions de l'environnement auquel, il est soumis telles que la vitesse de montée en température, la température maximale atteinte et la durée d'exposition. L'exposition des structures en béton au feu génère plusieurs formes d'endommagement (instabilité) thermique comme éclatement et détachement du béton de surface (voir les figures ci-dessous).



**Figure I.3 :** Tunnel sous la manche en phase de réparation à la suite de l'incendie septembre 2008.

### I.3.7.1. Transformation de béton expose au feu :

Différentes transformation physico-chimiques des constituants du béton expose au feu sont montres dans le tableau ci-dessous selon les travaux conduit par Noumwe, Xing et Pily

**Tableau 1.1 :** Variations de température Sous l'effet des variations de température

Température	Phénomène
Entre 20 et 120°C	Départ de l'eau libre et une parle de l'eau lice.
Entre 130 et 170°C	A lieu la double réaction endothermique de décomposition du gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ .
Entre 100 et 300°C	Les premiers signes de destruction du C-S-H sont remarqués bien avant à 100°C et se poursuivent jusqu'à 300°C.
Entre 450 et 550°C.	A lieu la décomposition de la Pentlandite. Elle s'effectue en libérant de l'eau.
Autour de 570°C,	On observe la transformation de phase des granulats quartziques u en granulats quartzique qui s'accompagne d'un gonflement.
Entre 600 et 700°C.	Se produit la seconde étape de la déshydratation silicates de calcium hydratés. Cette déshydratation s'accompagne d'une libération des molécules d'eau
A partir de 650°C,	Le calcaire se décompose à partir de 650°C, en produisant un dégagement de chaleur et en libérant
A partir de 1300°C	La fusion de la pâte de ciment et des granulats. l'élimination des sulfates et l'évaporation des alcalins.

## **I.4. Les causes chimiques de dégradation:**

### **I.4.1. Les dégradations par agression chimique:**

Les bétons peuvent être confrontés à des environnements chimiquement agressifs du fait de l'activité biologique (algues, bactéries, etc.), d'agents corrosifs, de la réaction alcali-granulats ou cancer du béton.. Les bétons peuvent aussi manifester d'autres pathologies chimiques telles que la carbonatation, la réaction sulfatique, la corrosion, etc. La durabilité des armatures est nettement conditionnée par les conditions chimiques dans lesquelles elles se trouvent. Les armatures se corrodent lorsque le béton est acidifié. L'acidification sera surtout conditionnée par les conditions initiales de mise en œuvre par la nature du ciment et du rapport Eau/Ciment, les conditions de cure, l'exposition météorique ou la porosité .Les armatures peuvent aussi se corroder en présence de chlorures (environnement marin, sels de déverglaçage) ou encore de courant parasite (Dominique.B/2020).

### **I.4.2. Alcali-rection ou cancer du béton:**

Réaction qui se produit entre la solution interstitielle du béton, riche en alcalin, et certains granulats lorsqu'ils sont placés dans un environnement humide .Des gels gonflants apparaissent en développant des micro faïençages et un éclatement du béton et de un sens plus clair, (Ndzana.A et Tchoumi.S.2007). Cette réaction se produit entre les alcalins de la solution interstitielle du béton et le silice ou les silicates de certains granulats. Elle entraîne la formation de gels expansifs qui provoquent des gonflements et une fissuration du béton. Pour que la réaction se produise, trois éléments sont nécessaires :

- La présence en quantité suffisante de granulats réactifs (contenant de la silice amorphe ou incomplètement cristallisés, comme l'opale),
- Une teneur en alcalins (sodium ou potassium) élevée dans la solution interstitielle,
- Une humidité relative ambiante élevée (> 85 %).

Des recommandations pour la prévention des risques liés à l'alcali-réaction ont été établies et sont désormais intégrées à la norme NF EN 206-1 (Cebtp.I/2016). Cette réaction est à présent décelée dans la plupart des régions du monde. Ce fut probablement R.J. Holden qui observa pour la première fois aux États-Unis, en 1935, la présence de réactions chimiques dans les bétons, entre les ciments et certains granulats. Puis, Kammer et Carlson constatèrent également l'existence de désordres, mais c'est Stanton qui le premier précisa (en 1940) la nature des réactifs en cause dans les dégradations observées sur des chaussées en Californie. En France, il faut attendre la fin des années 1970 pour certifier la présence d'alcali-réaction au sein de quelques barrages ; et 1987 pour découvrir que plusieurs ponts sont atteints par cette



maladie Les structures les plus touchées sont celles qui sont en contact avec l'eau ou celles qui se situent dans des environnements humides ; ce sont donc essentiellement les ouvrages de génie civil et certaines pièces humides de bâtiments qui sont les plus vulnérables.

#### **I.4.2.1. La réaction alcali-silice:**

- Conditions indispensables pour le développement de l'alcali-réaction.
- La présence d'un granulat potentiellement réactif (silice réactive).
- Une concentration en alcalins ( $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$   $\text{OH}^-$ ) élevée dans la solution interstitielle du béton.
- Des conditions d'humidité suffisamment élevées ou présence d'eau



**Figure I.4 :** Le faciès le plus fréquent est la fissuration en réseau.

#### **I.4.3. Réaction sulfatique :**

Les sulfates proviennent essentiellement du milieu extérieur. Ces ions ne sont pas passifs vis-à-vis de la matrice cimentaire et conduisent à la formation de certains composés chimiques expansifs tels que : L'étrangéité, le gypse et la traumatise. Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations (Ndzana.A et Tcoumi S. 2007)

La réaction sulfatique interne, résulte lui aussi d'un choix inadapté des constituants du matériau soumis à des températures supérieures à 65 °C et à des conditions de forte humidité et alcalinité. Il sera difficile au premier coup d'œil de différencier ce désordre de l'alcali-réaction, puisque les déformations physiques du béton sont semblables. La meilleure méthode, selon Ginger, pour ralentir ce désordre serait de limiter les apports d'eau exogène. Pour le prévenir totalement, il faudra mettre en œuvre un ciment peu exothermique, utiliser de l'eau froide, voire incorporer des granulats préalablement refroidis à la glace. (Cebtp.I/2016).

#### **I.4.3.1. Les principaux paramètres de réaction sulfatique interne (RSI):**

A) Eau et humidité : On a pu constater depuis longtemps, aussi bien en laboratoire que sur ouvrages, le rôle fondamental de l'eau dans le développement de la réaction. L'eau est un milieu réactionnel nécessaire au déroulement de la réaction. Elle intervient aussi bien dans les processus de transfert que dans la formation des produits de réaction. La RSI touche essentiellement les parties d'ouvrage en contact avec l'eau (zone immergée, zone de marnage) ou soumises à des venues d'eau (défaut d'étanchéité, absence de drainage, etc.), voire exposées à un taux d'humidité élevé.

B) Température et durée de maintien : La température maximale atteinte ainsi que la durée de maintien à haute température conditionnent le risque de formation différée de l'étrangéité. Il a été montré en laboratoire que si la température dépasse 65 °C et que si les autres paramètres primordiaux sont présents.

C) Teneurs en sulfates et en aluminates du ciment: Les sulfates et les aluminates interviennent directement dans le mécanisme réactionnel pour former l'étrangéité qui est un trisulfure aluminaté de calcium hydraté. Par conséquent, la RSI n'est possible que si le ciment utilisé contient suffisamment d'aluminates tricalciques ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_3\text{A}$ ) et de sulfates  $\text{SO}_3$ .

D) Teneurs en alcalins du béton: Leur rôle sur la solubilité de l'étrangéité est bien connu. L'étrangéité est plus soluble quand le taux d'alcalins augmente. Du fait de la variation de la solubilité de l'étrangéité avec la température, une interaction forte existe entre ces deux paramètres au cours du processus de la RSI (Mohamed.B/2014).



**Figure I.5 :** La réaction sulfatique interne.

#### **I.4.4. Les sulfates:**

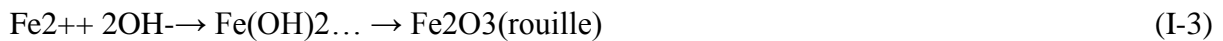
Un risque majeur d'agression chimique pour le béton et un phénomène d'expansion en relation avec la formation d'étrangéité. Les sources en sulfates peuvent être d'origine : Externe (sol, liquide, gaz) . Dégradation progressive depuis la surface vers le cœur de la pièce en béton Interne : RSI (formation différée de l'étrangéité), Remobilisation des sulfates du

ciment Dégénération généralisée de la pièce en béton La principale cause (indispensable mais non suffisante). Une élévation de la température pendant la prise du béton  $T > 65^{\circ}\text{C}$ .

#### **I.4.4. La corrosion:**

##### **I.4.4.1. Définition de la corrosion :**

Le processus de corrosion est un phénomène électrochimique qui se produit au sein du béton. Il a lieu à la suite de la carbonation du béton d'enrobage et/ou de la pénétration de ions chlorures. Et la corrosion de l'acier constitue la première cause de vieillissement prématuré et de dégradation de construction en béton armé à l'échelle internationale.



##### **I.4.4.2. Les facteurs influant sur la corrosion des armatures:**

- Humidité
- Influence de l'oxygène
- Influence de la température
- La carbonation
- La pénétration des chlorures
- Influence des organismes vivants
- Composition et dosage du ciment
- Les impuretés dans les agrégats
- Les impuretés dans l'eau de gâchage
- Les adjuvants.
- Effet de l'enrobage.

**I.4.4.3. Le mécanisme comprend deux phases :** La première, dite phase d'incubation, dépend en grande partie des processus assurant le transport des éléments agressifs jusqu'à l'armature, mais aussi des réactions chimiques se produisant au sein du béton et des réactions électrochimiques à l'interface. La seconde phase est la période de croissance pendant laquelle la corrosion se produit avec une certaine vitesse, conduisant à la formation de la rouille et aux états ultimes de dégradation. La pénétration des agents agressifs (Figure I.7) s'effectue sous forme gazeuse (molécules d'air ou de  $\text{CO}_2$ ) ou ionique. Les processus de transport font intervenir les phénomènes de diffusion et de convection ou de capillarité. Les fissures du

béton ont un rôle à part (Figure I.7) Ce sont en effet les passages préférentiels pour le milieu ambiant. Dans le cas où elles jusqua l'armature, le temps d'initiation est très court. Il se produit tout d'abord une perte d'adhérence locale, pouvant se propager suivant le profil de l'acier, pour dépasser localement le métal.

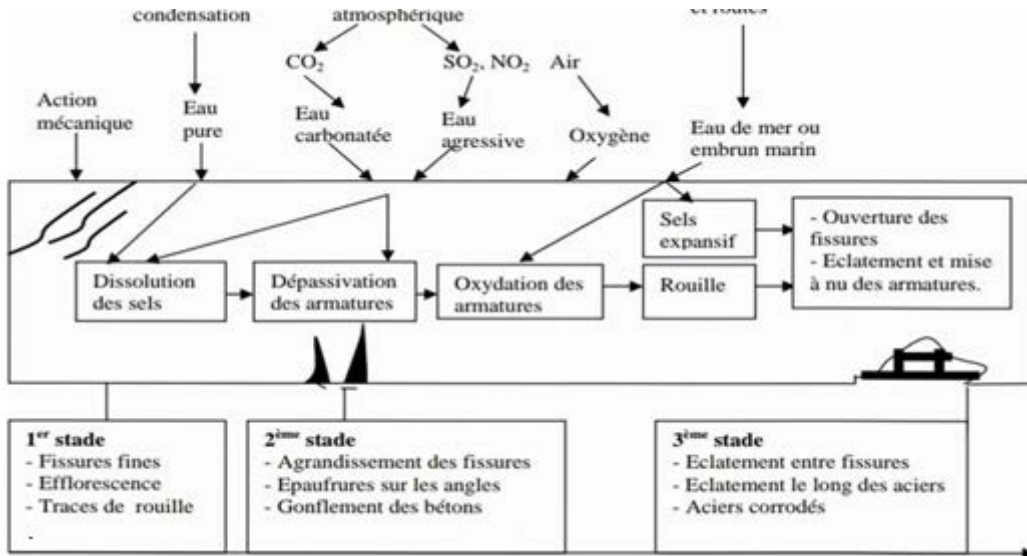


Figure I.6 : Processus de corrosion (Oazaa.K.2015).

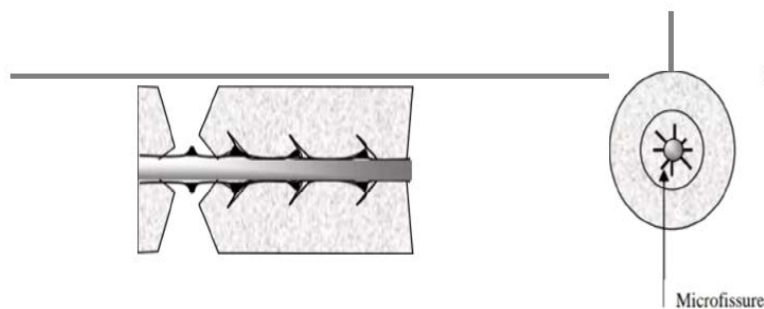


Figure 1.7 : Déformation du béton autour de l'acier, après formation de fissures internes

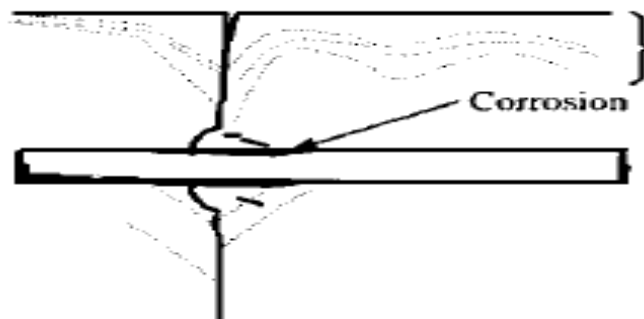
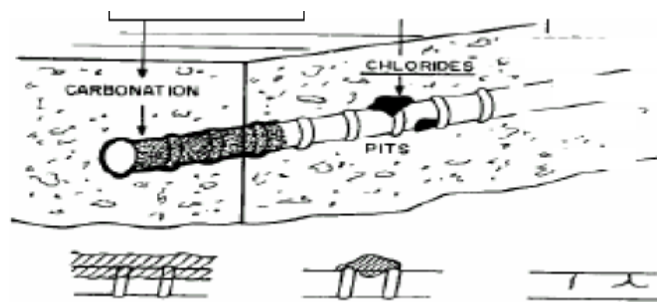


Figure 1.8 : Avancement du front de dépassement en fonction du temps.

#### 1.4.4.4. Les types de corrosion:

Aspect morphologique de la corrosion D'une manière générale l'examen à l'œil nu, à la loupe ou au microscope, permet d'identifier quatre types de corrosion.

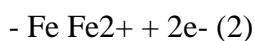
- A) Corrosion uniforme : C'est une corrosion qui se développe sur toute la surface du métal et à une vitesse presque identique en tous ses points
- B) Corrosion par piqûres et crevasses : Il s'agit de corrosion localisée. Certaines parties du métal restent inaltérées, tandis qu'en certains de ses points on observe une progression très rapide de la corrosion
- C) Corrosion inter granulaire : Elle se caractérise par la dissolution préférentielle des joints de Grains du métal. Pratiquement invisible à l'œil nu, elle conduit à la décohésion du métal et en modifie considérablement les caractéristiques mécaniques, en particulier l'allongement et la charge à la rupture.
- D) Corrosion transgranulaire : Ce type de corrosion est caractéristique des corrosions sous contraintes. Il se manifeste par la progression de fines fissures (où le métal est dissous) perpendiculairement aux contraintes principales de tension.



**Figure I.9 :** Type de corrosion dans le béton : uniforme (carbonatation), localisée (chlorure).

E) La corrosion sous contrainte : C'est une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique. Une pile de corrosion est une pile électrochimique qui se forme lorsque deux parties d'une structure possèdent un potentiel électrique différent. La différence de potentiel résulte souvent des hétérogénéités du matériau ou du milieu environnant. La surface de l'acier est alors constituée d'une multitude de micro-piles, elles-mêmes constituées de zones dites anodiques où les électrons sont libérés et de zones cathodiques où les électrons sont consommés. En milieu aqueux, le processus de corrosion électrochimique de l'acier peut être décrit de manière simplifiée par deux réactions électrochimiques élémentaires simultanées.

Dans la zone anodique, l'acier se dissout :



(I-4)

Les réactions cathodiques correspondantes sont la réaction de l'oxygène dissous dans l'eau (I-5) ou la réduction du proton avec dégagement d'hydrogène (I-6) :



Les ions hydroxyde  $OH^-$  formés dans la solution peuvent ensuite se combiner aux ions ferreux  $Fe^{2+}$  et précipiter en hydroxyde ferreux à la surface de l'acier, lorsque les concentrations en ions ferreux et hydroxyde le permettent :



### **I.5. Les autres causes de dégradation des bétons:**

Nous avons vu que les bétons se dégradent à cause des milieux dans lesquels ils sont placés car ils y subissent des agressions physiques et chimiques. Certaines causes, essentiellement dues à une mauvaise mise en œuvre, peuvent également participer à la dégradation des bétons.

#### **I.5.1. Mauvais positionnement des armatures :**

Les armatures (généralement en acier) placées trop près du parement béton lors du coulage provoquent à terme des fissurations de surface.

#### **I.5.2. Mauvaise disposition des armatures :**

Un défaut de l'enrobage des armatures (distance entre acier et béton), par suite d'une erreur de lecture de plan de ferrailage ou bien d'une insuffisance de cales assurant le maintien des armatures à l'intérieur des coffrages peut entraîner ce type de désordre. Sous la pression du béton, la souplesse des cages d'armatures fait que celles-ci peuvent se coller contre le coffrage.

#### **I.5.3. Mauvaise qualité des bétons employés :**

Un béton trop faiblement dosé en ciment, mal vibré, présentera un aspect défectueux : nids d'abeilles, faïençage, fissures superficielles, trous laissant les armatures apparentes.

#### **I.5.4. Vibration trop importante :**

Une vibration trop longue peut entraîner une ségrégation du béton et par conséquent une mauvaise répartition des constituants. Les efforts mal répartis entraînent alors des fissurations et des élancements du béton.

#### **I.5.5. Cycle humidité / sécheresse :**

Les cycles répétés d'humidité/sécheresse entraînent des variations dimensionnelles du béton pouvant créer des fissures et par conséquent la corrosion des aciers. (Nabila Boualla /2011).

### **I.5.6. Cas particulier de l'action de l'eau de mer :**

L'action de l'eau de mer est complexe. Moins nocive que certaines eaux fortement salées par suite d'une carbonatation de surface du béton faisant obstacle au lessivage de la chaux et à la pénétration des sulfates, elle agit principalement par l'intermédiaire du sulfate et du chlorure de magnésium qu'elle contient, parfois par l'intermédiaire de l'hydrogène sulfuré (cas de la mer Méditerranée). Ce sont, bien sûr, les parties de structure situées dans la zone de marnage qui sont les plus exposées ces réactions chimiques, en plus de l'action mécanique des vagues.

### **I.5.7. Mise en œuvre :**

Le béton est un des rares matériaux de construction où les composants sont rassemblés site, ou près du site de construction, pour ensuite être dosés, malaxés et mis en place dans les coffrages pour obtenir un produit fini. Il existe un très grand nombre de variables qui contrôlent ce type de production. Il y a donc toujours une possibilité qu'il y ait un maillon faible dans la chaîne de production qui fasse en sorte que la durabilité de l'ouvrage soit handicapée. Si les méthodes de mise en place et de mûrissement ne permettent pas au béton de développer toutes ses qualités, la durabilité de l'ouvrage pourra être considérablement réduite.

## **I.6. Les outils d'analyse:**

### **I.6.1. Le scléromètre:**

Contrôler la dureté de surface du béton avec les mesures au scléromètre (marteau de Schmidt) sont destinées à caractériser la dureté de surface d'un béton. Les mesures ne doivent pas être effectuées au-dessous de +5 °C et au-dessus de +35 °C (Dominique.B/2020). Il est nécessaire de procéder à une quinzaine d'essais sur chaque zone testée pour déduire une valeur moyenne représentative. Le scléromètre est un instrument particulièrement performant pour préciser l'homogénéité de la résistance du béton aux différents points d'une structure, mais l'information sur le béton reste imprécise par cette méthode (Mohcene .B.2009).



**Figure I.10:** Le scléromètre

### **I.6.2. Le Ferroscan:**

Ce balayage pachométrique ou levé d'armatures est un scanner qui permet d'accéder aux informations d'enrobage des armatures (profondeur, précision), estimation du diamètre des armatures, présence d'armatures adjacentes, reconnaissance du profil de l'acier etc...

### **I.6.3. L'auscultation par ultrasons:**

Cette méthode permet d'estimer la résistance d'un béton ou de détecter la présence de microfissures internes. C'est une corrélation entre la résistance, la vitesse du son VL, la compression RC, et le module d'élasticité.



**Figure I.11 :** Appareil d'auscultation par ultrasons.

### **I.6.4. Le millivoltmètre:**

Ce balayage potentiométrique est un champ de potentiel qui mesure entre le réseau d'armatures et la surface du béton à l'aide d'un millivoltmètre sensible et d'une électrode de référence impolarisable; cette technique permet d'évaluer le degré de la corrosion des armatures

Le fissuromètre Ces Capteurs ou fissuromètres permettent de suivre l'évolution de la fissuration (Dominique.B/2020).

### **I.6.5. Carottage:**

Le prélèvement de carotte a comme but de faire des analyse en laboratoire. Ces examens peuvent être demandés en vue de: (figure I.14)

- Examen pétrographique pour identification des agrégats, détériorations des agrégats, homogénéité du béton, profondeur de carbonations, répartition des fissures.
- Analyse chimique
- Essais physico – mécanique : densité, résistance à la compression, module d'élasticité





**Figure I.12:** La Carotteuse

### **I.7. Conclusion:**

Le présent chapitre porte sur les différents types de désordres affectant les structures en béton armé. L'étude pathologique des ouvrages d'art et des bâtiments en béton armé, met en évidence des phénomènes de dégradations des matériaux (vieillessement, corrosion), des erreurs de conception ou de mise en œuvre. Vis-à-vis des différentes causes de désordre, le renforcement et/ou réparation des ouvrages en béton armé semble une alternative possible pour améliorer la rigidité et augmenter la résistance des constructions existantes.

Chapitre II:  
Les principales techniques  
de réparation et de  
renforcement

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

Dans la majorité des cas, les structures en béton armé ont une excellente durabilité, qui mérite donc d'être conservées, même si l'exigence fonctionnelle des ouvrages est évaluée avec le temps. En plus, les structures en béton présentent des qualifications indéniables à la transformation et pour le renforcement nombreuses solutions sont disponibles. Les renforcements des structures devraient supporter des sollicitations plus grandes que celles prévues à l'origine. Le renforcement utilise des procédés qui sont applicables aux travaux de réparation. Il s'agit là d'enlever le béton dans les zones où les aciers sont corrodés. Les armatures existantes conservées doivent être bien soignées afin d'éviter une continuité de leurs dégradations. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration et contribuer à la résistance des sections ainsi renforcées. La liaison s'effectue par soudure ou bien par scellement tout en respectant les longueurs de recouvrement et d'ancrage. La géométrie d'origine doit être régénérée avec des mortiers riches pour augmenter l'adhérence et la résistance mécanique de sections finale (Mohcene.B.2009).

Avant de s'engager dans un renforcement ou dans une réparation des éléments de structures, qui présentent des dégradations dans les armatures ou dans le béton, il est indispensable de faire un diagnostic déjà cité précédemment et à savoir les causes. En ce qui concerne le choix de la méthode de renforcement ou de réparation et des matériaux à utiliser, il faut les définir en fonction des critères qui sont : « l'importance et la nature des désordres constatés », et encore il faut tenir compte des critères économiques des techniques choisies et de matériaux de construction. On peut procéder à la réparation ou au renforcement pour les éléments insuffisamment résistants, pour les parties dont les sections sont trop défaillantes et sollicitées une réparation pour le béton ou les armatures est souvent utilisées, par contre le renforcement des éléments des structures a pour but d'améliorer et augmenter leurs caractéristiques de manière pour offrir des meilleurs solidité (Abou.C.2016).

### **II.2. Adjonction d'armatures complémentaires:**

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupés accidentellement. Cette solution peut également être envisagée lorsqu'il s'agit de renforcer une structure. Dans tous les cas, les armatures existantes conservées doivent faire l'objet de soins de manière à éviter la poursuite de leur dégradation. Un étaieement et un déchargement de l'ouvrage à réparer peuvent éventuellement être nécessaires. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance

des sections renforcées. Il faut donc porter une attention particulière à la disposition et à l'ancrage de ces armatures.

Les armatures complémentaires peuvent s'inscrire dans la géométrie de l'élément (par exemple, en les disposant dans des engravures dimensionnées en fonction du diamètre de l'acier et des caractéristiques du produit d'enrobage; ( Figure II-1).

La protection des armatures en surépaisseur est assurée par un béton coulé, ou projeté. Dans tous les cas, un enrobage minimal égal au diamètre des barres est nécessaire.

### II.2.1. Mise en place des armatures complémentaires:

A cette étape des travaux, un contrôle du diamètre résiduel des armatures les plus fortement attaquées sera effectué (à l'aide d'un pied à coulisse par exemple).

Les armatures supplémentaires de même nature seront mises en place, par scellement, soudure, ou des systèmes explicite de fixation (cheville, tiges collées, boulonnage), afin de restituer la section initiale, avec une tolérance de 5%, en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement, et des armatures de couture. Dans le cas de soudure, celles-ci devront être effectuées, selon les normes en vigueur, après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée (Mohcene.B.2009).

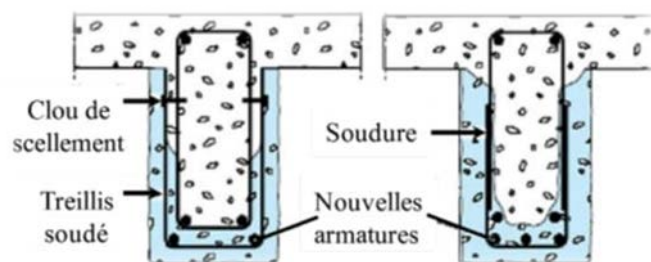


Figure II.1 : Réparation de poutre par adjonction d'armature.

### II.2.2. Protection des armatures:

La protection des armatures consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont dégagées, un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion. Ce traitement n'est réellement nécessaire que si, pour des raisons techniques, l'enrobage final ne peut pas avoir la valeur prévue dans les règlements, pour un environnement donné. Il est également fonction de la nature du produit de reconstitution du parement.

On devra également s'assurer de la compatibilité avec les traitements ultérieurs (électriques notamment). Cette application doit suivre immédiatement le décapage, car l'oxydation des armatures risque de s'amorcer et de compromettre la bonne tenue de la réparation (J. Perchat.1986).

### **A) Processus de protection des armatures:**

La protection des armatures est liée à deux processus :

- Chimique, par l'alcalinité produite lors de l'hydratation du ciment ;
- Physique, par l'enrobage agissant comme une barrière vis-à-vis de l'environnement.

Immédiatement après sa mise en place, le béton jeune entourant les armatures constitue une barrière protectrice, car l'hydratation du liant hydraulique libère de la chaux et des sels alcalins. Il se produit à la surface de l'acier une fine couche dite de passivation qui protège l'armature. Ce film protecteur est constitué d'oxydes ou d'hydroxydes. D'après les diagrammes tension-pH fondamentaux, la composition de cette pellicule protectrice comprend soit du  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , du  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , du  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ou  $\text{FeOOH}$  selon les oxydes pris en compte. En fait, la nature exacte du film passif dépend du pH, du potentiel de l'acier et de la teneur en oxygène du milieu. Son épaisseur est très faible (quelques nanomètres).

La seconde barrière qui sert de couverture aux agents de l'environnement extérieur est constituée par l'épaisseur et la qualité du béton de recouvrement. Suivant la constitution de ce béton (forte compacité, faibles porosité et perméabilité), un écran plus ou moins important s'oppose aux agents agressifs, gaz carbonique de l'air qui neutralise l'alcalinité du béton et chlorures. Bien entendu, si les matériaux utilisés (ciments, eaux, granulats, adjuvants) contiennent par nature des chlorures, ils seront les premiers générateurs de la corrosion (Marc.M.1994).

### **B) Protection cathodique des armatures:**

La protection cathodique est une technique permettant de stopper un processus de corrosion. Elle doit être appliquée avant que les risques d'ordre mécanique soient importants. Couramment utilisée pour protéger les matériaux métalliques immergés ou enterrés, elle n'est évoquée ici que dans le cas des armatures du béton.

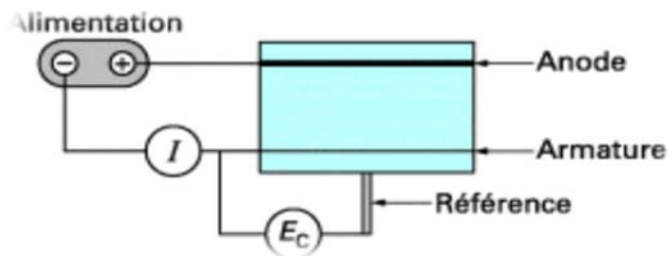
Cette méthode consiste à abaisser en tout point de l'armature le potentiel (potentiel de structure) de ce métal jusqu'à une valeur dite potentiel de protection, qui est telle que la vitesse de corrosion de l'acier devient négligeable. L'abaissement de potentiel est obtenu en imposant le passage d'un courant électrique qui va de l'enrobage vers l'armature. Ce potentiel ne doit pas être trop négatif, sinon l'eau interstitielle du béton pourrait se décomposer par électrolyse. De l'hydrogène pourrait alors se former et fragiliser les aciers à haute résistance, tels que les armatures de précontrainte.

**Tableau II.1:** Comparaison des caractéristiques générales des produits de protection

+++ très satisfaisant ++ satisfaisant + passable 0 mauvais comportement ou n'apporte rien.

Caractéristiques	Hydrofuges de surface	Minéralisateurs	Peintures	Revêtements plastiques épais	Revêtements minces LHM : liant hydraulique modifié ; LR : liant à base de résine.	
					LHM	LR
Étanchéité	0	0	0	0	++	++
Imperméabilisation	++	++	++	++	+++	+++
Compatibilité avec la fissuration à venir	0	0	+	+	+	+
Durabilité	+	+	++	++	++	++
Régularité de teinte	0	0	+++	+++	+++	+++
Aptitude à couvrir les irrégularités de parement	0	0	+	+++	+++	+++
Aptitude à couvrir le faïençage	0	0	+	+++	+++	+++

La polarisation est presque systématiquement obtenue grâce à une alimentation à basse tension, en courant continu, dont le pôle négatif est relié à l'armature et le pôle positif à une anode placée à la surface du béton d'enrobage (figure 2-2)



**Figure II.2:** Principe de la protection cathodique des armatures dans le béton

La protection cathodique des armatures du béton est un procédé efficace lorsqu'elle permet la formation, à leur surface, de produits passivants sans cesse renouvelés. Il ne s'agit donc pas d'éliminer les possibilités de dissolution métallique, mais de passiver les aciers quelles que soient les agressions venant du milieu extérieur (jean-armand.C, roger.L.1999).

### II.2.3. Réfection des bétons:

La réfection des bétons consiste à rétablir l'enrobage des armatures par la mise en œuvre d'un mortier riche. Ce dernier doit respecter les critères :

- De la tenue d'aplomb de l'élément.
- D'une résistance mécanique supérieure ou égale au béton support.

- D'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support.
- D'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs.
- D'un coefficient de dilatation thermique équivalent au béton support.
- D'une bonne protection d'aciers.

Ces critères sont assurés par l'utilisation de mortiers à base de résine pour améliorer les propriétés de l'apport, surtout lorsqu'il réagit dans la partie de l'interface où il y a plusieurs phénomènes tels que: l'influence du retrait en terme de glissement sur l'interface du béton initial et le béton nouveau.

Ce type de réparation demande généralement, pour être efficace, une augmentation non négligeable des dimensions des éléments de structure et l'emploi d'un volume relativement important de matériaux , ce qui n'est plaisant ni sous l'aspect économique, ni sous l'aspect esthétique ,dans le cas de structures de façades .( figure II.3)



**Figure II.3:** Renforcement d'une poutre par adjonction d'armatures additionnelles en sa partie inférieure.

### **II.3. Projection du béton:**

#### **II.3.1. Introduction:**

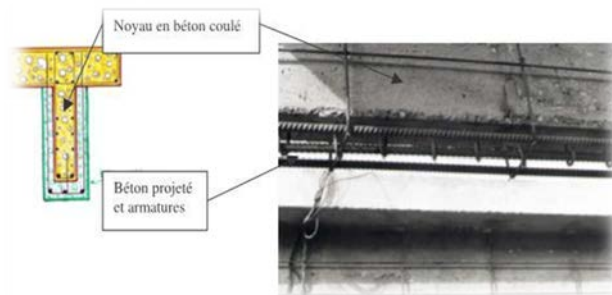
La technique de projection du béton a d'abord été utilisée pour réparer des structures endommagées et conforter des tunnels. Cette technique a ensuite bénéficié de nombreuses évolutions pour être actuellement utilisée de façon courante en réparation et renforcement d'ouvrages, afin de mettre en place des matériaux lorsque les moyen traditionnels de mise en œuvre s'avèrent moins adaptés ou plus couteux.

Il existe deux techniques principales de projection du béton, dont la différence principale réside dans la chronologie des opérations élémentaires: une projection par voie sèche (avec ou sans prémouillage) et une projection par voie mouillée ( à flux dilué ou à flux dense). La plupart des adjuvants et additions utilisés dans la fabrication des bétons mis en place par coulage peuvent être incorporés dans le béton projeté. La nature de ces ajouts est à adapter au mode de projection utilisé. En fait, la plupart des matériaux employés, pour fabriquer des

bétons spéciaux mis en œuvre par coulage sont utilisables pour élaborer des bétons projetés particuliers:

- Les bétons projetés léger à base de granulats légers (argiles ou schiste expansé).
- Les bétons projetés de fibres à base de fibres métalliques, mais aussi à base de fibres de verre.
- Les bétons projetés avec incorporation de fumé de silice.

Il y'a lieu de faire une distinction entre le béton et le mortier projeté utilisés en réparation de structure. La dimension maximale des granulats utilisés permet de différencier le mortier du béton. Le mortier à des granulats dont la dimension est inférieure ou égale à 5mm. Le béton contient des granulats dont la dimension peut aller jusqu'à 16mm en voie sèche et 12mm en voie mouillée, ces valeurs sont celles actuellement compatibles avec le matériel couramment utilisé et correspondant à celle du mélange avant projection. Le terme "béton projeté" peut alors parfaite exagérée, quand la valeur de dimension des granulats du béton est de l'ordre de 6 à 8mm, car il s'agit en fait d'un "micro-béton" (figure 2-4 ). (Mohcene.B.2009)



**Figure II.4:** Renforcement d'une poutre au moyen de béton projeté



**Figure II.5:** Renforcement d'une poutre au moyen de béton projeté

### II.3.2. Technique de protection du béton:

Lorsque l'enrobage des aciers est trop poreux ou d'épaisseur insuffisante, ou lorsque l'environnement est particulièrement agressif, il est souvent nécessaire d'appliquer un traitement de protection du béton. Une telle protection peut aussi être appliquée à un mortier



fraîchement déposé, vis-à-vis des agressions atmosphériques, des fondants, de l'eau de mer, des attaques chimiques ou bactériologiques ou, tout simplement, vis-à-vis de la pénétration de l'eau, afin d'assurer une plus grande durabilité de la réparation. On distingue:

- Les hydrofuges de surface.
- Les minéralisateurs.
- Les peintures.
- Les revêtements minces à base de liant hydraulique modifié ou à base de polymère.
- Les revêtements plastiques épais
- Les produits d'imprégnation inhibiteurs de corrosion, dont les mono fluoro phosphates (MFP) dont le but, en pénétrant à travers le béton, est de ralentir et de stopper la corrosion des aciers. Apparus récemment sur le marché, leur mode d'action est encore mal connu (Mohcene .B.2009).

### **II.3.3. Description des deux méthodes:**

Des guides sur la formulation, la mise en œuvre et le contrôle sont disponibles sur le site Asquapro. Se reporter également à la norme NF P 95-102 et aux normes européennes qui traitent surtout de la voie mouillée (cf. Projet de renforcement ou de réparation d'un pont (Doc. C 7 803).

### **II.3.4. Projection par voie sèche (avec ou sans pré-mouillage):**

Avec cette technique, le mélange des constituants (à l'exception de l'eau) est introduit dans la machine à projeter, puis propulsé dans une canalisation par un flux d'air comprimé. Dans la projection sans pré-mouillage, l'eau est introduite au droit de la lance de projection, tandis qu'avec pré-mouillage l'eau est ajoutée dans la conduite deux à trois mètres avant la lance, ce qui a pour effet de diminuer l'émission de poussières.

### **II.3.5. Projection par voie mouillée:**

Le mélange de tous les constituants du béton, y compris l'eau, est introduit dans la machine à projeter. Le transport est effectué dans une canalisation, soit par un flux d'air comprimé pour la voie mouillée à flux dilué, soit par pompage pour la voie mouillée à flux dense. Dans les deux cas, une injection d'air comprimé à la lance de projection est nécessaire pour accélérer la vitesse de projection. Le béton peut être fabriqué dans une centrale à béton de chantier ou une centrale de béton prêt à l'emploi.

Chacun des procédés ayant ses avantages et ses inconvénients, il convient donc de choisir le mode de projection à utiliser suivant la nature des travaux à réaliser.

#### **A) Formulation du béton:**

La plupart des adjuvants et additions utilisés dans la fabrication des bétons spéciaux mis en place par coulage peuvent être incorporés dans le béton projeté, par exemple :

- 1) Les bétons à base de ciment fondu ou de ciment prompt ;
- 2) Les bétons légers à base de granulats légers (argile ou schiste expansé) ;
- 3) Les bétons à base de fibres métalliques, de verre ou de polypropylène ;
- 4) Les bétons avec incorporation de fumée de silice...

Il y a lieu de faire une distinction entre le béton et le mortier projeté utilisés en réparation de structures. Le mortier, appelé parfois « gunite », a des granulats dont la dimension D est inférieure ou égale à 5 mm, tandis que le béton contient des granulats dont la dimension peut aller jusqu'à 16 mm en voie sèche, et 12 mm en voie mouillée.

Concernant le béton projeté utilisé en réparation ou renforcement d'ouvrages d'art, la dimension maximale des granulats se trouve être limitée par la nécessité de réaliser la mise en place du béton projeté en plusieurs passes d'épaisseur 5 à 7 cm, sans recours à l'emploi d'accélérateur de prise.

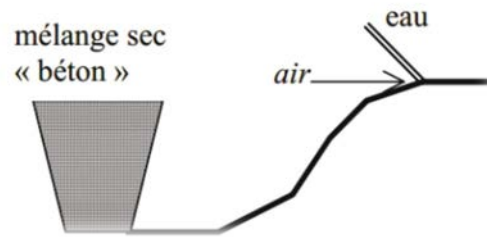
#### **II.3.6. Mise en œuvre du béton projeté:**

Le processus de mise en place du béton est différent selon le type de voie utilisé.

**A) En voie sèche :** les divers éléments sortent de la lance avec une vitesse très élevée (de l'ordre de 100 m/s), et les gravillons qui arrivent avec une forte énergie sur le support rebondissent, alors que les grains de ciment et les gouttelettes d'eau forment un film de pâte pure qui adhère au support et qui accueille des grains de sable de plus en plus gros. La couche de mortier ainsi formée permet ensuite aux gravillons de s'insérer. Le rebond des gravillons diminue et la forte énergie cinétique des gravillons qui viennent frapper le béton en place assure son compactage et procure à ce matériau de meilleures performances mécaniques que celles du béton mis en œuvre par voie mouillée.

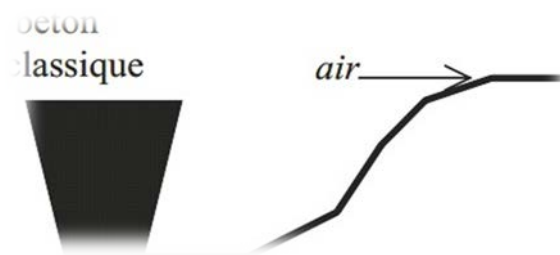
Ce mécanisme d'adhésion rend inutile toute interposition d'une résine d'accrochage. Selon cette méthode, il est possible de transporter le béton sur des distances importantes : plus de 500 m à l'horizontale, et plus de 100 m à la verticale.

La voie sèche, en raison d'une résistance élevée, d'une bonne adhérence au support et d'une faible fissuration du béton projeté mis en œuvre, est donc bien adaptée à la réparation du béton et aux renforcements structuraux de ponts en béton ou en maçonnerie.



**Figure II.6 :** projection par voie sèche.

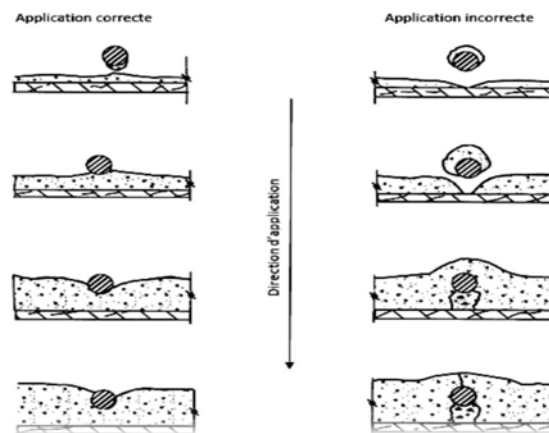
**B) En voie mouillée :** les rebonds de gravillons sont beaucoup plus faibles qu'en voie sèche, car ceux-ci arrivent sur le support en étant déjà enrobés par du liant, ce qui facilite leur accrochage. La projection d'un matériau mouillé évite la production de poussières qui constitue un inconvénient de la voie sèche. Dans le cas de la voie mouillée à flux dense, la vitesse de sortie du béton à la lance est relativement faible (de l'ordre de 1 m/s), et les caractéristiques mécaniques du matériau s'en trouvent diminuées par comparaison avec la voie sèche.



**Figure II.7:** Projection par voie humide.

**C) La voie mouillée à flux dilué :** constitue une solution intermédiaire de mise en œuvre, qui fournit un béton projeté dont les caractéristiques mécaniques se rapprochent davantage de celles du béton projeté par voie sèche.

La voie mouillée est donc employée préférentiellement dans le domaine des tunnels, de la projection sur terrain (talus, fouilles, berges...) et de la réparation des maçonneries (Armand.C.2009).



**Figure II.8 :** L'application correcte et incorrecte de l'enveloppement des bars par le béton projeté.

#### **II.4. Chemisage en béton armé:**

Le chemisage en béton armé résulte une augmentation de la section du poteau et cluse fait par l'addition des armatures longitudinales et transversales à l'élément déjà existant et puis la mise en place d'un nouveau béton d'enrobage. Cette technique est appliquée pour les poteaux afin d'assurer les besoins suivants :

- Augmentation de la portance.
- Augmentation de la résistance en flexion et au cisaillement.
- Augmentation de la capacité de déformation.

Une préparation de la surface de l'élément en béton armé est demandée, pour cela un décaissement est nécessaire dans le béton pour une amélioration de la des efforts, le traitement de la surface est fait avec une couche primaire de résine époxy. Si le renforcement est avec des armatures, cela conduit à une mise en place des armatures (Figure II.9 ). puis la réalisation de bétonnage par coulage ou pompage est faite.



**Figure II.9 :** Chemisage en béton armé



**Figure II.10 :** Chemisage en béton armé

Le chemisage en béton armé exige une préparation d'interface pour obtenir un bon lien entre la nouvelle colonne et l'ancienne, ce qui donne un effet monolithique.

Alors une augmentation de la rugosité de la surface est demandée, suivie de l'application d'agent de liaison. Plusieurs méthodes sont utilisées pour augmenter la rugosité de l'interface : sablage, (electrichammering) (Abou.C/2016).

#### **II.4.1. L'adhérence béton-acier:**

##### **II.4.1.1. Définition:**

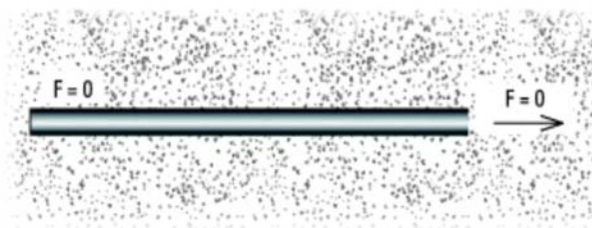
L'adhérence est l'action des forces qui s'opposent au glissement des armatures dans le béton. L'adhérence est un phénomène de frottement entre l'acier et le béton dont le coefficient vaut 0,4, ce qui correspond à un angle de frottement de  $\pi/8$ . L'adhérence permet aux armatures de transmettre les efforts au béton par contact entre les deux matériaux.

##### **II.4.1.2. Le rôle de l'adhérence:**

S'il n'y avait pas d'adhérence entre le béton et l'acier, le matériau « béton armé » n'existerait pas.

Adhérence assure trois rôles : S'il n'y avait pas d'adhérence entre le béton et l'acier, le matériau « béton armé » n'existerait pas.

- Elle assure le scellement (ou l'ancrage) des barres (figure II.12) .



**Figure II.11 :** Scellement de la barre dans le béton

- Elle s'oppose au glissement des barres tendues.
- Elle distribue la fissuration (figure II.13).

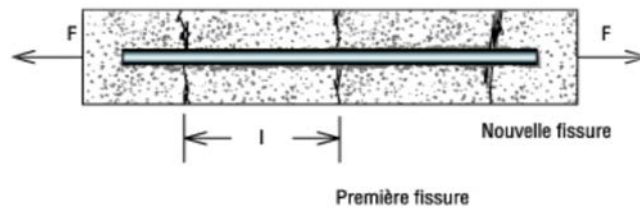


Figure II.12 : Distribution de la fissuration.

**II.4.1.3. Expérience du « pull-out »:** Cette expérience consiste à soumettre une barre ancrée dans une éprouvette de béton et soumise à une force de traction jusqu'au glissement (figure II.14).

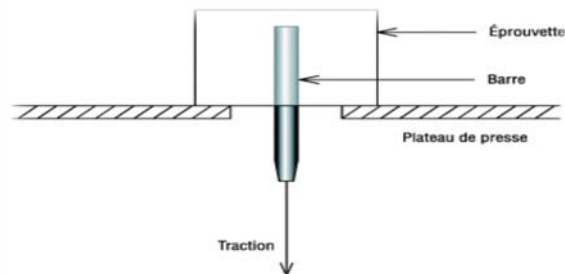


Figure II.34 : Essai du (pull-out)

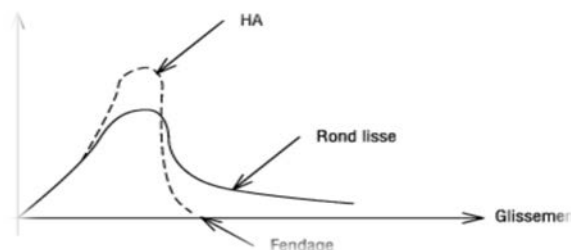


Figure II.14 : Diagramme du glissement

#### II.4.2. Adhérence entre les deux bétons:

L'adhérence représente la résistance au cisaillement, en l'absence d'un effort de compression normal sur cette interface et d'une armature de couture qui la traverserait. Cette adhérence est due essentiellement à une liaison chimique entre le béton existant et le nouveau béton. La valeur maximale de l'adhérence est atteinte pour des valeurs de glissement d'environ 0,01 à 0,02 mm et est maintenue pratiquement constante jusqu'à des valeurs de glissement de l'ordre de 0,05mm.

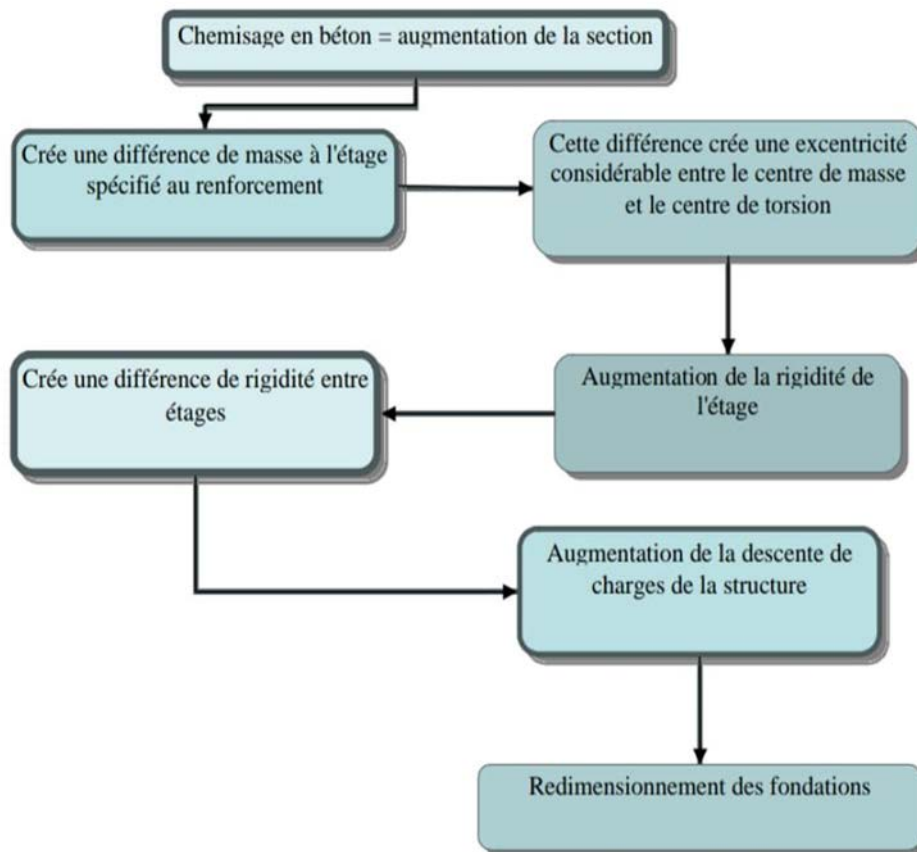


Figure II.15 : Organigramme du processus de chemisage en béton armé

#### II.4.3. Avantages et inconvénients du chemisage en béton armé:

Grace à sa rentabilité, le chemisage en béton armé est la méthode la plus choisie dans un renforcement sismique des éléments. En plus, chaque ingénieur est familier avec l'application du béton, il est le plus courant. Ensuite, le chemisage en béton armé est la technique la plus convenable sur un élément endommagé. En outre, les bétons sont versatiles et s'adaptent à presque toutes les formes. Finalement, en utilisant le chemisage en béton, on peut améliorer la raideur, la résistance au cisaillement, la capacité de déformation élastique, la continuité des éléments, le moment résistant, et la résistance à la flexion (section de l'élément augmente). Mais, il ne faut pas oublier que cette technique induit à un désavantage en ce qui concerne l'espace, vu que les dimensions vont augmenter. De plus, lors de la mise en place d'un tel type de chemisage, le poids de la structure augmente, les travaux sont assez longs et une grande perturbation aura lieu : un grand amont de poussière, débris et pollution se créent (Mariana.A.2015).

## **II.5. Renforcement par gainage métallique :**

### **II.5.1. Introduction:**

Ce type de renforcement est utilisé généralement pour les poteaux ; l'union de la platine à la structure peut se faire par : Collage, vissage, ou bien ancrage. Du point de vue transmission des efforts, la meilleure technique est celle du collage.

### **II.5.2. Les matériaux utilisés :**

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

B) La tôle : les tôles d'aciers sont généralement de qualité courante, leur épaisseur est limitée à 3mm de façon à leur permettre de suivre les courbures du support Si des sections d'acier plus importantes sont nécessaires, il est préférable de superposer des tôles plutôt que d'augmenter l'épaisseur dans le but d'épouser l'allure de la déformée de la section de béton renforcé (exemple: ressorts à lames des camions) (Perchat.J.1991).

### **II.5.3. La mise en œuvre des plats collés:**

Pour parvenir à des fins de mise en œuvre correcte, il est impérativement souhaitable à procéder à un sablage, permettant une préparation d'une grande surface de collage, sans attaquer en profondeur les parements.

Un mortier de ragréage est destiné à pallier, dans certains endroits, le manque d'enrobage des armatures internes ou bien à replanir les surfaces, sans pour autant dépasser les 20% des surfaces destinées au collage.

A) La colle est généralement une résine époxy choisie pour ses propriétés d'adhérence à l'acier et au béton. Une attention particulière doit être accordée aux conditions atmosphériques environnant le site lors de la mise en œuvre des tôles. La colle n'apporte pas de résistance mécanique, mais transmet fortement les efforts.

B) Les tôles ou platines de renfort, constituées, dans la plupart des cas, de tôles en acier. Ces tôles possèdent une épaisseur de 3 à 5mm et doivent subir toute leur préparation en usine (découpage- pré assemblage si besoin, abattage des arrêtes ainsi qu'un éventuel sablage) pour



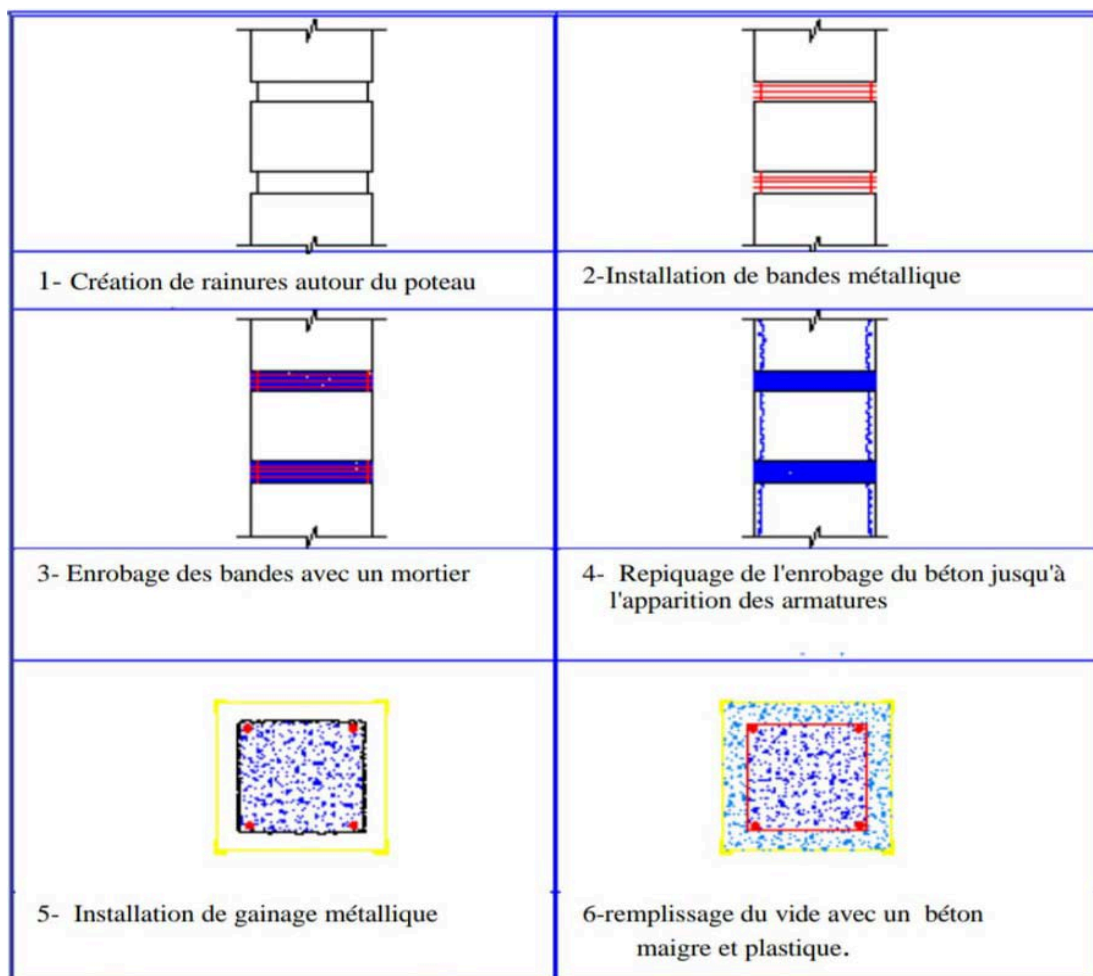
avoir une bonne tenue de l'adhérence entre l'acier et la colle. Les tôles doivent être protégées en utilisant une pellicule, de même nature que celle qui doit être appliquée avant encollage.

C) La protection des aciers contre la corrosion sur leur face visible doit être assurée. En fin des travaux les aciers doivent être protégés contre la corrosion.

D) Après l'enlèvement de vernis de protection ou de primaire de protection, la colle est étalée sur tôle et sur le surface du béton l'épaisseur minimale mise en œuvre sur chaque face est de l'ordre du millimètre.

E) Le dispositif de serrage peut, suivant le cas, être constitué de serre-joints, de barres filetées transvasant l'élément à renforcer, doit permettre d'appliquer sur toute la tôle une pression voisine de  $4 \text{ N/mm}^2$  durant toute la durée de polymérisation de la colle. Comme représenté dans la Figure II.17.

## II.6. Le renforcement au moyen de profilés métalliques:



**Figure II.16:** Différents étapes renforcement d'un poteau par gainage métallique.

L'association des profilés métalliques aux structures en béton armé permet d'augmenter la capacité portante de la structure. La réalisation ainsi d'une structure mixte acier-béton dont il faut assurer la compatibilité entre ces deux matériaux est indispensable et nécessaire. Cette compatibilité entre les deux matériaux est liée directement à la qualité de l'interface (acier-béton) pour bien transmettre les efforts internes. L'intérêt de cette méthode est la rapidité de réalisation in-situ, les pièces métalliques sont préfabriquées en atelier, et leur montage s'effectue à l'aide de cheville ou tiges ancrées. L'assemblage sur site des éléments décomposés en tronçons facilite ainsi leur transport et mise en place. L'inconvénient majeur de cette méthode de renforcement.

Tient à la précision qui est requise lors du mesurage de la structure existante, si les éléments fournis se positionnent correctement au montage. Il est recommandé d'envisager des possibilités d'ajustement et de positionnement des pièces métalliques pré-forées vis-à-vis de forages dans le béton, lors du montage, contrairement aux constructions métalliques nouvelles (Perchat.J.1991).



**Figure II.17 :** Renforcement de poteaux au moyen de profilés métallique

### **II.7. Renforcement par précontrainte additionnelle:**

La précontrainte additionnelle est, en général, extérieure. Ce n'est que pour des précontraintes courtes ou très courtes (étriers actifs) ou pour des précontraintes prévues dès le projet pour être mises en place dans des réservations spécifiques que la précontrainte additionnelle peut être placée à l'intérieur même du béton. En règle générale, son application suppose un traitement préalable des éventuelles fissures par injection avec un produit rigide car elle ne peut, à elle seule, refermer les fissures (Daniel .P, Jean-A.2010) Cette technique consiste à mettre en œuvre une précontrainte (câbles, barres ou montrons) dans un ouvrage pour en améliorer la résistance d'ensemble vis-à-vis de la flexion et/ou de l'effort tranchant. La détermination de l'effort de précontrainte résulte d'un calcul schématiquement illustré sur la figure II.19 (Jean.A, Roger .L.1999).

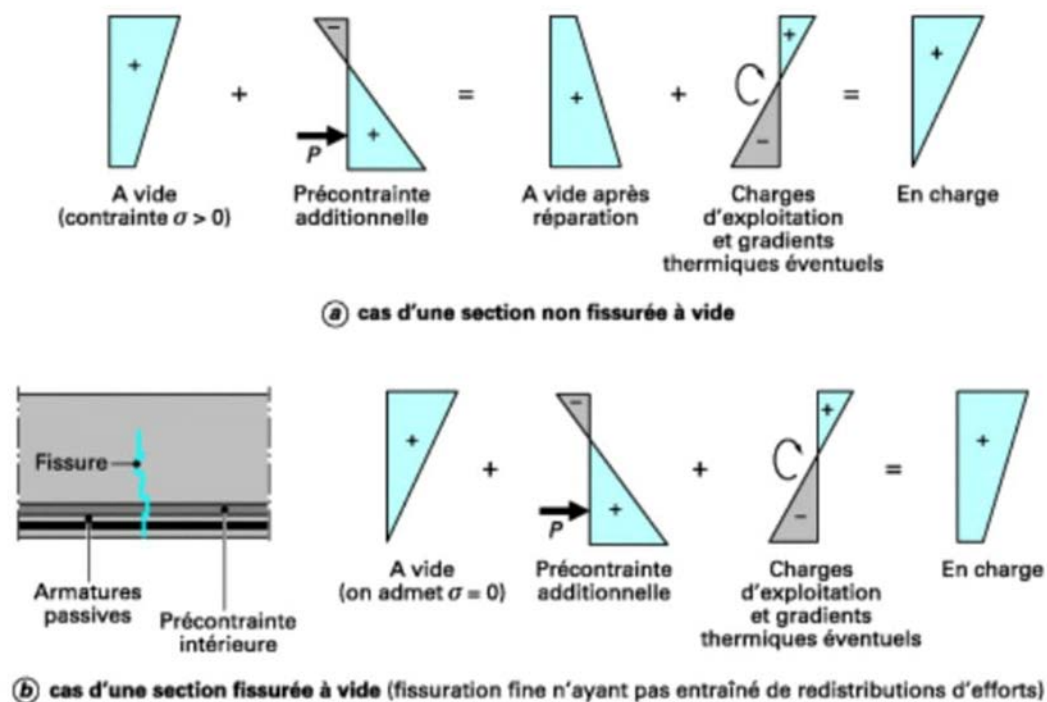


Figure II.18 : Effets d'une précontrainte additionnelle.

Signalons seulement que, les armatures étant disposées à l'extérieur du béton, il est parfois nécessaire de vérifier la sécurité de la structure vis-à-vis d'un phénomène de flambement en compression, et de s'assurer que les armatures ne risquent pas d'entrer en résonance sous l'effet des vibrations induites par le trafic.

Lorsqu'il s'agit de disposer une précontrainte additionnelle dans un ouvrage fissuré, les fissures, dans la mesure où leur ouverture est supérieure au seuil d'injectable (0,2 à 0,3 mm), doivent être injectées pour rétablir la continuité du matériau béton avant la mise en tension des armatures additionnelles, sinon la précontrainte passe par les « points durs » et ne rétablit pas correctement la continuité mécanique de la pièce.

Cependant, dans certains cas particuliers, il a été admis :

- D'une part que le hourdis inférieur d'une poutre-caisson pouvait se décompresser sous réserve que le bas des âmes et les goussets inférieurs dans lesquels se trouvaient tous les câbles de précontrainte restent comprimés.
- D'autre part que l'injection des fissures pouvait être évitée si la réparation était provisoire (renforcement provisoire d'un pont sans coupure de la circulation en attendant la construction de l'ouvrage de doublement).

Lorsque l'ouvrage présente une insuffisance de résistance vis-à-vis de modes de sollicitation complexes associant la flexion, l'effort tranchant, la torsion et la diffusion des efforts de précontrainte (dans les zones d'ancrage), le renforcement peut être réalisé en déviant la précontrainte longitudinale additionnelle de façon à lui donner une inclinaison adéquate là où elle est bénéfique et/ou en disposant des étriers actifs constitués de barres ou de mono torons gainés protégés.

### II.7.1. Les différents tracés de la précontrainte additionnelle:

Le tracé des armatures de précontrainte additionnelle peut être rectiligne ou polygonal. Un câblage rectiligne est plus pratiques et aussi facile à le mettre en œuvre et les pertes d'effort par effet de frottement sont localisées au voisinage des zones d'ancrages, et sont de faibles estimation.

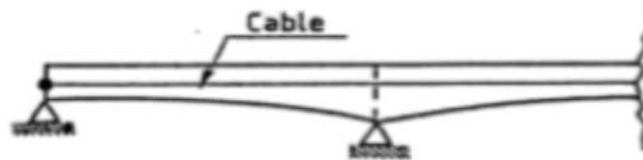


Figure II.19 : Le tracé rectiligne

Par contre le tracé polygonal qui consiste à dévier les câbles, de façon à optimiser l'effet de la précontrainte tant sur le plan de la résistance en flexion que sur celui de la résistance à l'effort tranchant. Les pertes par frottement sont un peu plus fortes que dans le cas d'un tracé rectiligne, tout en restant modérées, et la mise en œuvre est plus compliquée, à cause de la confection des déviateurs, mais c'est la conception la plus courante.



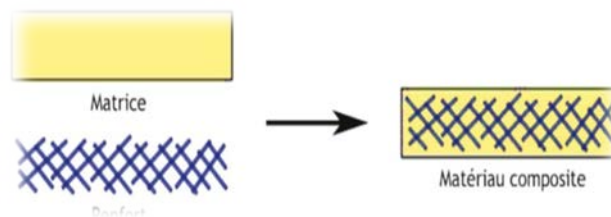
Figure II.20 : Le tracé polygonal.

### II.8. Renforcement par matériaux composites:

La technique de renforcement par des matériaux composites Pour les éléments structuraux porteurs est l'une des techniques efficaces pour l'accroissement de la résistance de ces derniers. Cette technologie possède une application simple, peu exigeante en main-d'œuvre, et n'est pas dérangeante pour les occupants des ouvrages.

En plus, la résistance aux substances chimiques et la corrosion sont des caractéristiques dont les matériaux composites présents donnent à cette technique une durée de vie plus longue que les matériaux traditionnels tels que l'acier. Cette technologie de renforcement à long terme.

Les termes « composites amélioré », « matériaux composite renforcé de fibres » ou FRP « polymère renforcé de fibres » sont généralement destinés pour désigner les matériaux en fibres telles que la fibre d'aramide, la fibre de verre et la fibre de carbone fixée dans une matrice (résine époxy). Ces matériaux possèdent un rapport résistance-poids plus élevé par rapport aux matériaux de construction traditionnels comme l'acier, encore les composites de fibres a une résistance à la corrosion excellente.

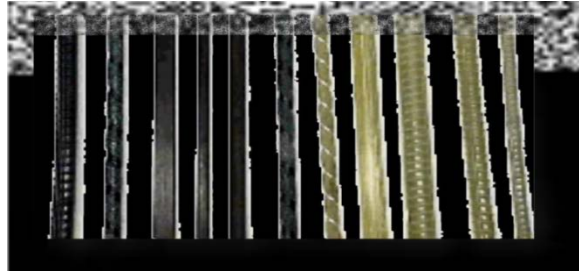


**Figure II.21 :** Composants d'un matériau composites

Les renforcements des structures en béton armé soit en utilisant des barres en matériaux composites (Polymères Renforcés de Fibres- FRP) qui sont disponibles sous différentes formes (rond, carré, rectangulaire et ovale, ainsi que bande) fabriquées par pultrusion, soit en utilisant des tissus composites fabriqués avec des fibres dans un ou au moins deux directions différentes par la technique du collage à l'extérieur. Carbone (C), Verre (G) et Aramide (A) sont les principales fibres qui composent la phase fibreuse de ces renforts, tandis que dans la phase de matrice la plupart des cas, l'époxy est utilisé pour lier l'ensemble des fibres.

Dans la plupart des études existantes, les matériaux composites en fibre de carbone (CFRP) et en fibre d'aramide (AFRP) en utilisant la méthode de renforcement NSM ont été utilisés pour renforcer les structures en béton. Les matériaux composites en fibre de verre (GFRP) ont été utilisés dans la plupart des applications de la méthode NSM pour les structures en maçonnerie et en bois. La résistance à la traction et le module élastique des matériaux composites en fibre de carbone, sont beaucoup plus élevés que ceux en fibre de verre (GFRP) et en fibre d'aramide (AFRP), donc pour la même capacité à la traction, une barre en fibre de carbone a une section transversale plus petite de celle en verre (GFRP) ou en fibre d'aramide (AFRP), et donc nécessite une petite engravure. Cela conduit à une installation plus facile, avec moins des risques d'interaction avec les armatures en acier, et avec des économies dans le matériau de scellement des barres composites dans l'engravure.

Les barres composites (FRP) sont également fabriquées avec une grande variété des textures de surface, qui affectent fortement leur comportement d'adhérence du renforcement de NSM. Leur surface peut être lisse, sablée, ou rugueuses avec une préparation de surface par un tissu d'arrachage « Peel-ply ». Les barres rondes peuvent également être enroulées en spirale avec des fibres en étoupe, ou rainurées (Amjad.K.2012).



**Figure II.22 :** Types de barres composites (FRP) insérées avec la technique NSM.

### **II.8.1. Technique de renforcement:**

Un processus généralement pareil pour les étapes de la mise en place des matériaux composites, malgré la variation de l'installation du système de renforcement d'un installateur ou d'un fabricant à l'autre. Ce processus peut se résumer par :

- A) Examiner et réparer les surfaces effritées et les fissures de la surface de l'élément à renforcer.
- B) Appliquer une couche du mastic de vitrier après la préparation de la surface de l'élément en éliminant les saillies.
- C) Mettre en place les tissus de fibres sur la surface après une application d'une première couche d'agent d'imprégnation.
- D) Répéter l'étape précédente jusqu'à ce que les couches demandées de fibres soient installées.



**Figure II.23 :** Chemisage d'un poteau par PRFC.

### II.8.2. Les applications des FRP en génie civil:

Le génie civil a actuellement une consommation petite de matériaux composite comparativement aux différents secteurs tels que l'industrie aérospatiale ou celle de l'automobile. Cependant, dans les prochaines années il existe une réelle perspective pour leur utilisation dans la réhabilitation des constructions industrielles et civiles.

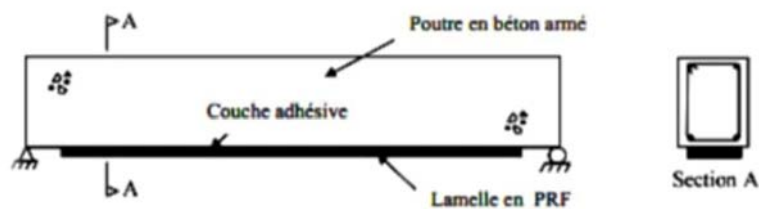
Cette perspective a apporté les centres et les laboratoires à travers le monde d'étudier les Différentes aspects des éléments soit réparés ou renforcés par des « FRP ».

Généralement, les polymères renforcés de fibre « FRP » résultent des avantages efficaces dès qu'il s'agit de la réparation, la protection et le renforcement des éléments de structures en BA comme la poutre, poteau, mur ou dalle.

### II.9. Le renforcement des poutres à l'aide du matériau composite:

Le renforcement de la poutre en béton armé vis-à-vis à la flexion en utilisant les composites se fait en reliant un collage des lamelles « PRF » sur la partie externe du support de la poutre (figure II.25).

Une préparation du support doit être exécutée après le collage de ces lamelles de « FRP ». Cette préparation de support est très importante cela conduit à une surface adéquate dont les couches faibles sont éliminées, et cette surface adéquate a comme but l'amélioration de la liaison avec le FRP (Abou.C.2016).



**Figure II.24 :** Renforcement par une lamelle en PRF d'une poutre.



**Figure II.25 :** Poutres en BA renforcées par matériaux composites.

### **II.10. Conclusion et choix de la méthode de renforcement:**

En conclusion et d'après les inconvénients des techniques de renforcement traditionnelles qui nécessite souvent de grandes moyens humains et matérielles pour une capacité assez limitée, les techniques de renforcement par matériaux composites offrent des meilleures performances avec moins de moyen et une facilité de mise en œuvre considérable ce qui nous a poussé à opter pour les matériaux composites comme choix de moyen de renfort utilisé dans la présente étude l'application de plaque en matériaux composite est une alternative intéressante aux méthodes de réparation conventionnelle.

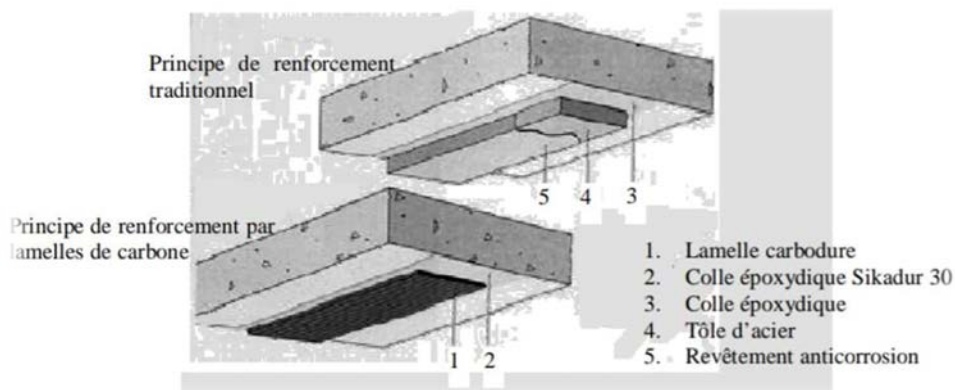
C'est pour cette raison que Le choix de renforcement à l'aide de matériaux composites de l'élément à renforcer dont a fait l'objet de cette étude est jugé favorable.



Chapitre III:  
Les Matériaux composites  
classiques et avancés

### III.1. Introduction:

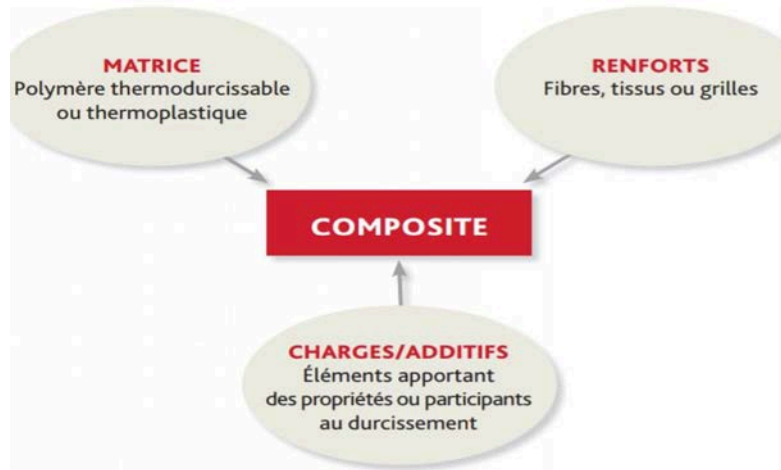
Les composites, produits de synthèse, donnent des concurrences aux métaux parce qu'ils sont légers, inaltérables et que leur résistance dépasse celle de l'acier (leur rapport résistance/poids est très élevé), en effet les plaques de PRF sont normalement au moins deux fois et peuvent être 10 fois plus résistantes que les plaques en acier tandis que leur poids est seulement 20% celui de l'acier. Depuis une dizaine d'années, ils sont présents dans le secteur de la construction, en particulier pour des interventions de renforcement d'ouvrages. Les matériaux composites composés des fibres de verre, d'aramide ou fibres de carbone, de par leur souplesse, leur facilité d'installation et leurs caractéristiques mécaniques adaptées, permettent d'intervenir sur des ouvrages de formes complexes. Ils s'adaptent à toutes les formes de supports et ne requièrent aucun placage sous pression et apportent une performance à la structure que l'on ne retrouve pas avec les méthodes traditionnelles (béton armé ou plats métalliques collés). Toutefois, la pose, d'une apparente simplicité, est en fait très technique et nécessite une grande minutie au niveau de la préparation lors de l'encollage. (Merdas.A.2005).



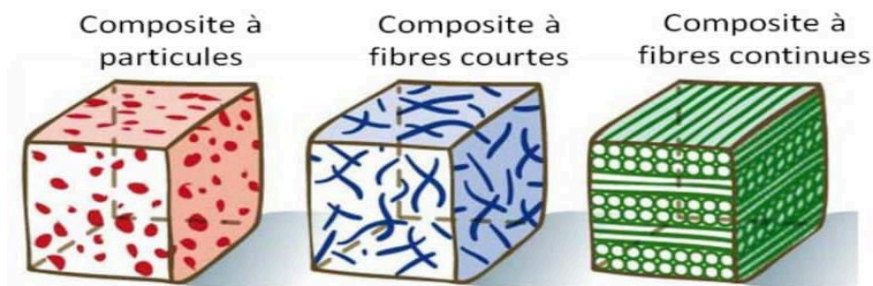
**Figure III.1 :** Principaux renforcement-Tôle d'acier et bande de PRF (lamelles).

#### III.1.2. Définition :

Un matériau composite est constitué de deux ou plusieurs matériaux dont les propriétés individuelles se combinent pour former un matériau hétérogène ayant des performances globales fortement améliorées. (source Action Composite). Bien qu'il existe différentes sortes de matériaux composites (comme par exemple, le béton, la boue, le contreplaqué...), ce terme s'adresse plus particulièrement aux pièces plastiques constituées d'une matrice polymère et d'un élément renforçant de type fibreux tel que défini dans la figure.



**Figure III.2 :** Composition d'un matériau composite.  
(Marc.M.2014)



**Figure III.3 :** Représentation schématique d'un matériau composite de type particule.

### III.1.3. L'intérêt des composites:

Les matériaux composites, en fonction de leurs constituants, présentent un grand nombre d'intérêts.

- D'un point de vue mécanique, ils offrent d'excellentes propriétés en traction, flexion, compression, cisaillement plan et transverse ainsi qu'une excellente absorption aux chocs. Leur résistance mécanique combinée à leur faible densité en font un élément incontournable des conceptions actuelles qu'elles soient structurelles ou non.
- D'un point de vue physico-chimique, ils s'adaptent parfaitement à différents milieux ambiants et peuvent être très performants en termes de résistance aux produits chimiques, au feu, ou à la corrosion.

Néanmoins, leur plus grand intérêt réside dans la possibilité de pouvoir intégrer plusieurs fonctions en une seule opération réduisant de fait et de façon conséquente, le nombre de pièces d'un ensemble mécanique ou d'une conception et par là même son coût de revient. Bien que leur fabrication nécessite des investissements parfois lourds en termes d'outillages de

moulage, ils constituent un compromis technico-économique intéressant lorsqu'ils sont fabriqués en série (Marc.M.2014).

On distingue deux types de composites :

#### **A) Grande diffusion :**

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : Optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe du matériau (moulage par contact, SMC et injection).

#### **B) Hautes performances :**

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%.

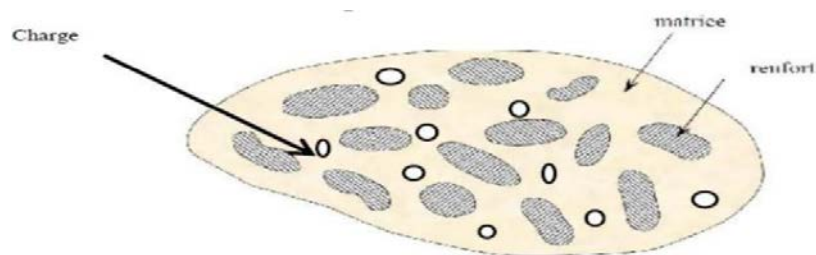
Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes :

- Drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM.
- Beaucoup de procédés encore manuels (Metrane.N.2019).

#### **III.1.4. Les constituants :**

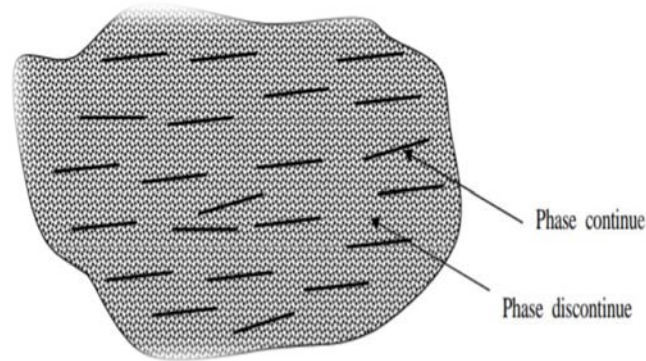
En général les constituants principaux d'un matériau composite sont :

- La matrice.
- Le renfort.
- Les charges et les additifs



**Figure III.4 :** Matériau composite.

**III.2. Les caractéristiques générales :** Un matériau composite consiste dans le cas général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée " la matrice ", la phase discontinue est appelée "le renfort " (figure III.5).



**Figure III.5:** Les différents types de composites.

### III.2.1. Les propriétés des matériaux composites résultent en:

- Les propriétés des matériaux constituants.
- Leurs distributions géométriques.
- Leurs interactions.

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier:

- La nature des constituants et leurs propriétés.
- La géométrie du renfort, et sa distribution.
- La nature de l'interface: matrice-renfort.

La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, sa concentration et sa disposition (son orientation).

La concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique (fraction en volume) ou par la fraction massique (fraction en masse), la concentration du renfort est un paramètre déterminant des propriétés mécaniques du matériau composite.

- Dans le cas d'une distribution non uniforme du renfort, la rupture du matériau sera initiée dans des zones pauvres en renfort, diminuant ainsi la résistance du composite.
- Dans le cas des matériaux composites dont le renfort est constitué de fibres, l'orientation des fibres détermine l'isotropie du matériau composite. Cet aspect constitue une des caractéristiques fondamentales des composites : la possibilité de contrôler l'anisotropie du produit fini par une conception et une fabrication adaptée aux propriétés souhaitées.

### III.3. Les matrices :

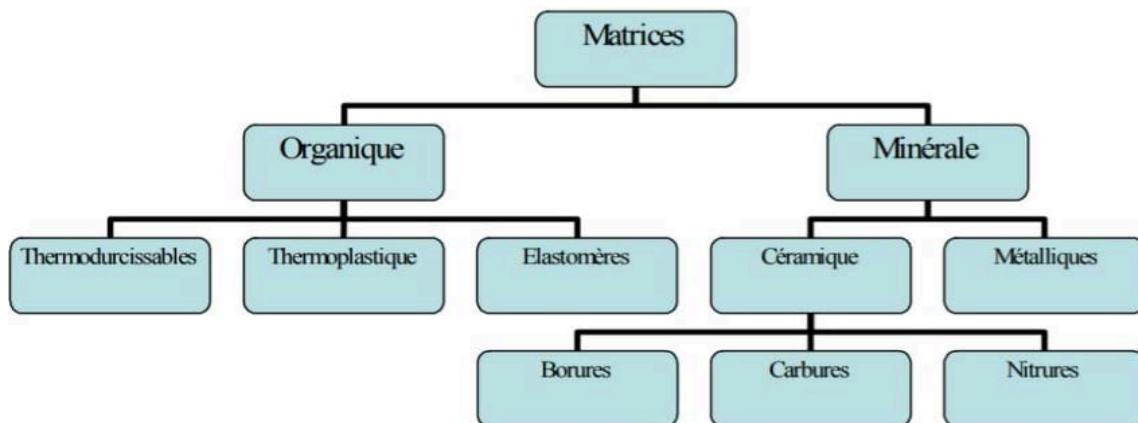
De fait de la faible section des fibres (diamètres de quelque  $\mu\text{m}$ ), elles ne peuvent être appliquées directement dans une application mécanique, de là l'idée de les mélanger dans une

matrice qui conduit à la fabrication du composite à fibres. La matrice qui est la liaison du FRP a encore des rôles important :

- Protéger les fibres de l'environnement et de l'abrasion
- Apporter la tenue chimique de la structure
- Lier les fibres de renforts ensemble
- Transmettre les forces entre les fibres
- Repartir les contraintes
- Donner la fore désirée au produit final.

Pour le choix des matériaux de matrices un critère important doit être pris en considération qu'ils aient une faible masse volumique, généralement la masse volumique de la matrice doit être considérée inférieure à celle des renforts, afin d'obtenir un poids global du composite qui est réduit au minimum. La matrice est un composite qui est constituée de deux matériaux homogènes. Le premier est la résine (polyester, époxy), et un second qui est le charge qui a le but de l'amélioration des caractéristiques de cette résine.

La matrice est l'élément qui lie et maintient les fibres. Elle répartit les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure (I-6). (Metrane.M.2019)



**Figure III.6:** Organigramme des différentes familles de matrice.

#### III.4. Les résines :

L'utilisation de la résine dans les matériaux composites a le rôle de transférer les sollicitations aux fibres et lui offre une protection de l'environnement extérieur. Deux familles de résines existent : les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques.

Les résines thermoplastiques : ce type de résine possède la capacité d'être mise en forme pour plusieurs fois et cela fait par chauffage et refroidissement, en plus sa récupération et son recyclage sont faciles. Elles ont un faible coût de production

Les résines thermodurcissables : les propriétés mécanique de ce genre de résine sont meilleures que la première. Encore, la mise en forme de ces résines est pour une seule fois et elles sont plus couteuses à la fabrication. L'époxy est une résine thermodurcissable (Abou.C.2016).

#### III.4.1. Différents types de résines :

A) **Les résines thermodurcissables (TD)** : Une résine thermodurcissable est une formulation de différents produits appartenant essentiellement à la chimie organique, qui possède la propriété de passer de façon irréversible d'un état liquide à un état solide.



Figure III.7: Structure moléculaire tridimensionnelle.

Elles se subdivisent de la façon suivante :

1) **Résines polyesters** : bon accrochage sur les fibres, prix bas, mais retrait important et tenue réduite à la chaleur humide

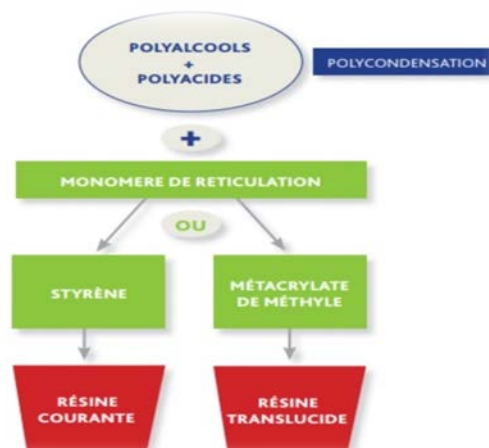


Figure III.8 : Composition d'une résine polyester.

**2) Résines époxydes** : ce sont les plus utilisées dans l'industrie aéronautique : bon accrochage sur les fibres, faible retrait au moulage (de l'ordre de 0,5 %) et bonnes propriétés mécaniques. Elles peuvent garder d'excellentes caractéristiques jusqu'à une température d'environ 160 °C .

Cette réaction plutôt lente, est souvent complétée d'une post-cuisson afin d'obtenir des propriétés mécaniques

**B) Les résines thermoplastiques (TP):** Les thermoplastiques sont des chaînes polymères reliées entre elles par de faibles liaisons.. Les thermoplastiques représentent le plus grand tonnage en termes de production à cause de leur facilité de mise en œuvre et des faibles coûts. Ce sont principalement les plastiques traditionnels (le polychlorure de vinyle PVC, le polyéthylène PE, le polypropylène PP, le polyamide PA, les polycarbonates PC, etc.). Leur recyclabilité et leur thermo réversibilité constituent des avantages très importants. Il existe aussi des thermoplastiques à usage spécifique qui peuvent résister à des températures de l'ordre de 200°C et même plus.

Les principales résines thermoplastiques utilisées sont les suivantes:

- Polyamide: une bonne tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.
- Polytéraphthalate éthylénique et butylique: bonne rigidité.
- Polycarbonate: une bonne tenue au choc.
- De phénylène: une résistance à l'hydrolyse.
- Polyoxyméthylènes: une bonne tenue à la fatigue.
- Polysulfurés: une bonne stabilité chimique.
- Polypropylène: assez stable en température, mais combustible

L'intérêt des résines thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois des matières premières disponibles et des procédés de fabrication, toutefois ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques, et thermomécaniques faibles.

Ces diverses résines peuvent être renforcées par des fibres courtes, cependant dans le domaine des composites ces résines ont un développement limité du fait de la nécessité de faire appel à des transformations à haute température de produits solides.

### **III.5. Les charges et les additifs :**

Les caractéristiques mécaniques et physiques sont améliorées par l'addition des charges et les additifs. Les charges et les additifs se différencient par leur rôle. Les charges améliorent ou font



augmenter les caractéristiques mécaniques de la résine et encore conduisent à une diminution dans la probabilité de fissuration de la résine. Tandis que les additifs facilitent le façonnage de la résine et son démoulage, ils réduisent le retrait de ce dernier lors de séchage et lui donnent une couleur. On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé.

### **III.5.1. Principales charges et principaux additifs utilisés:**

#### **A) Charge renforçant:**

**1) Charge sphériques renforçant :** L'intérêt principal de ce type chargé réside dans leur géométrie sphérique qui répartit régulièrement les efforts et évite les concentrations de contraintes. Les sphères (ou microbilles) sont pleines ou creuses, d'un diamètre compris généralement entre 10 et 150 $\mu$ m. Elles sont en verre, en carbone ou en matière organique (acrylique, polystyrène). Mais les charges sphériques les plus utilisées, plus de 99% des cas, sont les billes de verre creuses.

**2) Charges renforçantes non sphériques:** Ce sont des particules ayant la forme d'une écaille de 1 à 20 $\mu$ m d'épaisseur et de 100 à 500 $\mu$ m de côté. On utilise essentiellement le mica sous cette forme, mais il existe également des écailles de verre, d'alumine, de carbure de silicium notamment.

#### **B) Additifs :**

Lubrifiants et agents de démoulage : On distingue:

##### **1) Le lubrifiant interne:**

Facilite le façonnage par modification des forces de cohésion intermoléculaires, ce qui diminue la viscosité de la résine mais ne doit pas altérer ses propriétés. Il a généralement un faible poids moléculaire et des groupements fonctionnels polaires.

##### **2) Le lubrifiant externe :**

Agit à la surface de la résine pour réduire sa tendance à coller au contact des équipements (moules). Il a généralement un haut poids moléculaire et polaire.

### **III.5.2. Certains produits peuvent combiner les deux fonctions.**

- Esthétique : tissus enduits, ameublement...;

- Technique : amélioration de certaines caractéristiques physiques du polymère ou protection contre la lumière visible ou les radiations ultraviolettes ;
- Sécurité : signalisations fluorescentes des véhicules et des travaux routiers ;
- Repérage : câblerie ;
- Camouflage : armement.

### III.6. Les fibres:

#### III.6.1. Définition:

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).

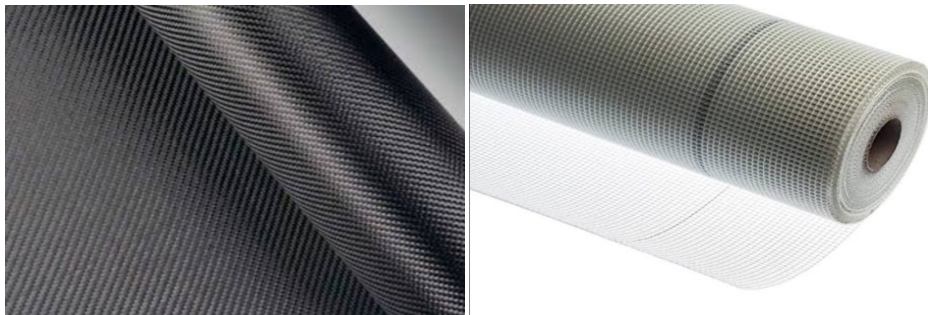


Figure III.9 : Tissus de renfort.

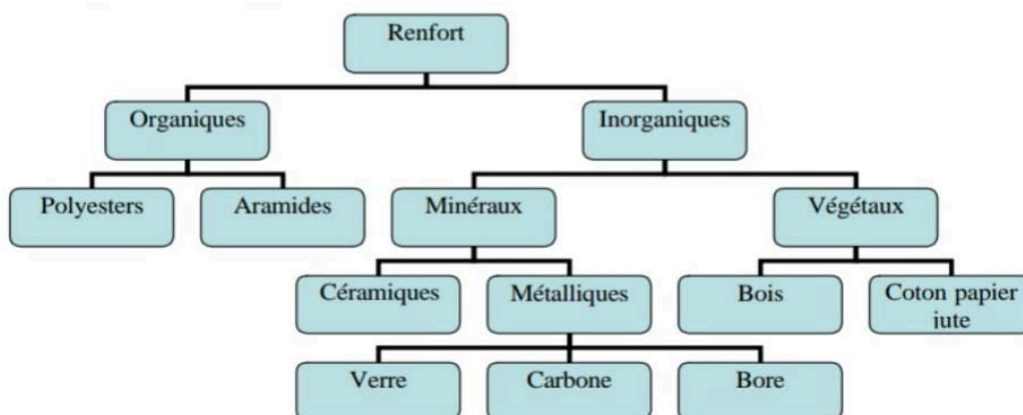


Figure III.10 : Organigramme des différentes familles de fibres.

Ces différents types de fibres sont classés selon la nature de leurs composants:

- Des renforts à base de fibres unidirectionnelles: orientés suivant une même direction de l'espace.

- Des renforts à base de fibres bidimensionnelles: surface tissées (tissus) .
- Des renforts à base de fibres tridimensionnelles: volumes préformés ou non, constitués par des fibres orientées.

#### A) Fibres de verre:

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance/prix qui les placent au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites.



Figure III.11 : Fibres de verres.

#### B) Les fibres de carbone:

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres utilisées comme précurseurs sont des fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur. Dans le principe d'élaboration, le PAN subit un traitement thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitisation. Le brai, qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille, est également utilisé pour produire des fibres de carbone.

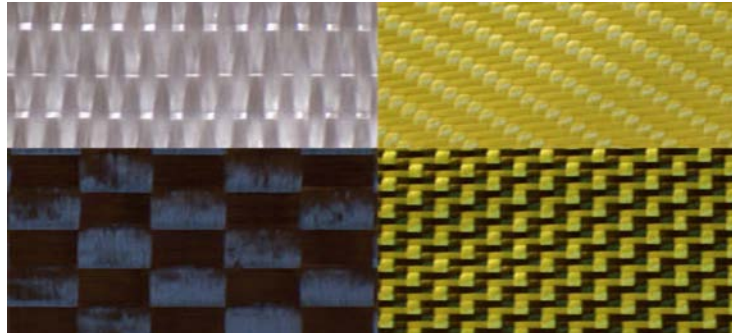


Figure III.12 : Fibre de carbone.

#### C) Les fibres aramides:

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbonés, mais leur résistance à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est

généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, différents ensimages de fibres peuvent être utilisés. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides.



**Figure III.13 :** Les Fibre d'aramide.

#### **D) Les fibres céramiques:**

Les matériaux composites de type céramique sont souvent constitués de renforts et de matrices en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. On retrouve ces fibres 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. Quelques exemples de fibres céramiques :

- Les fibres de carbure de silicium.
- Les fibres de bore.



**Figure III.14:** Fibre céramique

#### **E) Les fibres de basalte:**

Trois fois plus chère que la fibre de verre, la fibre de basalte est une fibre naturelle issue de la roche volcanique. Cette roche formée à partir de magma refroidi confère des propriétés exceptionnelles à la fibre de basalte. Elle est plus légère et plus résistante que la fibre de verre. Très utilisée dans l'automobile pour ses propriétés thermiques, elle est incombustible, possède de bonnes propriétés mécaniques et couvre une large plage de température qui lui confère un

réel avantage en matière d'isolation thermique :  $-260^{\circ}\text{C}$  à  $+ 1\ 200^{\circ}\text{C}$ . D'autre part, elle est imperméable et résiste aux radiations, aux acides ainsi qu'aux UV. Toutes ces fibres se présentent sous différentes formes comme indiqué dans le tableau 21 suivant.



**Figure III.15 :** Fibres de basalte.

### **III.7. Classification des matériaux composites:**

#### **III.7.1. Classification suivant la forme des constituants:**

##### **III.7.1.1. Introduction:**

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composants ou suivant la nature des composants. En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

##### **III.7.1.2. Les composites à fibres:**

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous une forme fibreuse. Les fibres utilisées se présentent, sous un aspect de fibres continues, sinon d'un aspect discontinu : ces fibres sont soit coupées, soit courtes. L'arrangement des fibres, et leurs orientations dans un plan, permet de moduler les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes.

##### **III.7.1.3. Les composites à particules:**

Dans ce cas lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques. Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées.

### **III.7.2. Classification suivant la nature des constituants:**

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant la composite matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Divers renforts sont associés à ces matrices, seuls certains couples d'association ont actuellement un usage industriel:

#### **III.7.2.1. composites à matrice organique avec :**

- Fibres minérales : verre, carbone.
- Fibres organiques : kevlar, polyamide.
- Fibres métalliques : bore, aluminium.

#### **III.7.2.2. Composites à matrice métallique avec :**

- Fibres minérales : carbone.
- Fibres métalliques : bore.
- Fibres métal –minérales. Fibres de bore revêtues de carbure de silicium.

#### **III.7.2.3. Composites à matrice minérale avec :**

- Fibres métalliques.
- Particules métalliques.
- Particules minérales.

### **III.8. Connaissance des technologies des matériaux avancés FGM:**

#### **III.8.1. Généralité:**

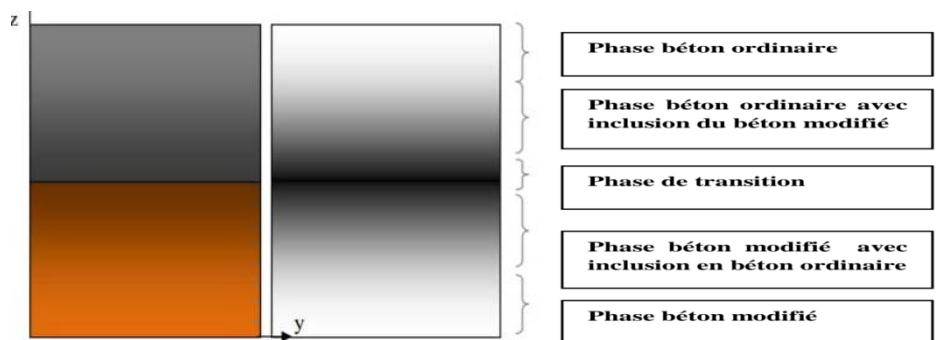
##### **III.8.1.1. Introduction:**

Généralement dans l'aéronautique et l'aérospatial les parois des navettes spatiales ou des avions hypersoniques sont exposées à des températures très élevées. Des composants tel que le cône d'entrée, les bords d'attaque des ailes ainsi que certaines surfaces inférieures sont soumis à des températures allant jusqu'à 1800°C en atmosphère, de ce fait les matériaux qui constituent ces composants doivent supporter un gradient thermique d'environ 1300°C dans une épaisseur d'une dizaine de millimètres, mais hélas il n'existait aucun matériau monolithique capable de résister à une telle contrainte thermique (Koizumi.M.1992).

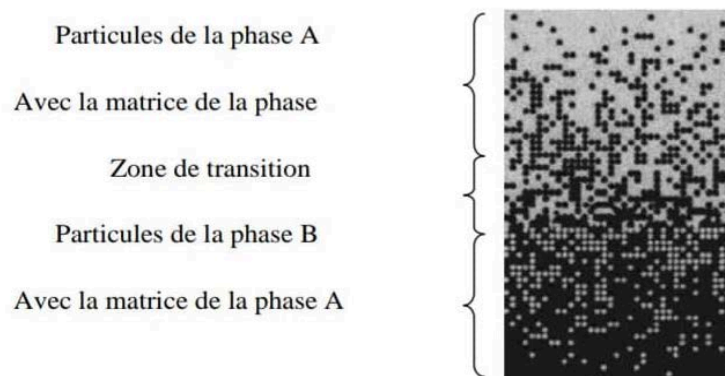
La solution trouvée c'était la mise en œuvre d'un matériau dont une face exposée à très haute température et qui possède des propriétés de résistance aux fortes chaleurs et à l'oxydation, faite par une céramique, et dont la face intérieure serait à la fois une bonne conductrice de chaleur et qui a une bonne résistance mécanique et une meilleure ténacité, réalisé par un métal. Cependant, si l'on considère un simple assemblage de ces deux matériaux, ils

présentent immédiatement une rupture due aux contraintes thermiques exercées à l'interface entre les deux types de matériaux ayant des propriétés thermiques différentes. Du coup l'idéal était de supprimer cette interface en créant une transition continue entre les deux faces. C'est ainsi qu'est né le concept des matériaux fonctionnellement gradués dans les années 80 du vingtième siècle par un groupe de chercheurs au laboratoire national d'aérospatial (National Aerospace Laboratoire, STA) au Japon.

Le FGM consiste en l'association de deux matériaux aux propriétés structurales et fonctionnelles différentes avec une transition idéalement continue de la composition, de la structure et de la distribution des porosités entre ces matériaux. Généralement, les « FGM » sont des matériaux constitués de plusieurs couches contenant des composants différents tels que les céramiques et les métaux vu la bonne résistance thermique du céramique et la bonne résistance mécanique d'un métal. Les vides sont également considérés comme une composante des matériaux FGM, ils sont donc des composites présentant des caractéristiques macroscopiquement non homogènes. Le changement continu dans la composition et donc dans la microstructure d'un matériau « FGM » est illustré dans la figure cas, on peut avoir une microstructure différente (Benbakhti.A.2017).



**Figure III.16 :** Variation continue des propriétés et de la microstructure (schématisée).



**Figure III.17 :** Matériaux à gradient fonctionnel avec des fractions volumiques des phases constitutives graduées

### **III.9. Domaines d'applications des matériaux fonctionnellement gradués:**

Le concept des matériaux fonctionnellement gradués est applicable dans nombreux domaines. Il a été initialement conçu pour l'industrie de l'aéronautique, où les FGM ont fournis deux propriétés contradictoires telles que la conductivité et l'isolation thermique. Actuellement, ils la production des matériaux légers, forts et durables, et ils sont applicables dans un large intervalle des domaines tels que :

#### **A) Aérospatial:**

Les matériaux à gradient fonctionnel peuvent être utilisés dans des conditions de haute température avec une de ses constituants à faible conductivité thermique. Ils peuvent résister à des gradients thermiques élevés, ce qui rend les matériaux à gradient fonctionnel appropriée beaucoup dans les structures aérospatiales comme les composants de véhicules spatiaux (moteur de fusée, corps des avions spatiaux.etc...)

#### **B) Médecine:**

Les FGM a trouvé une large gamme d'application dans le domaine dentaire et orthopédique pour les dents et le remplacement des os.

#### **C) Défense:**

Dans la demande de défense, tels que des plaques de blindage et des gilets pare-balles, la pénétration des matériaux résistants est nécessaire. Une des caractéristiques les plus importantes du matériau à gradient fonctionnel est la capacité à inhiber la propagation des fissures, ce qui rend les matériaux à gradient fonctionnel appropriés pour les applications de défense.

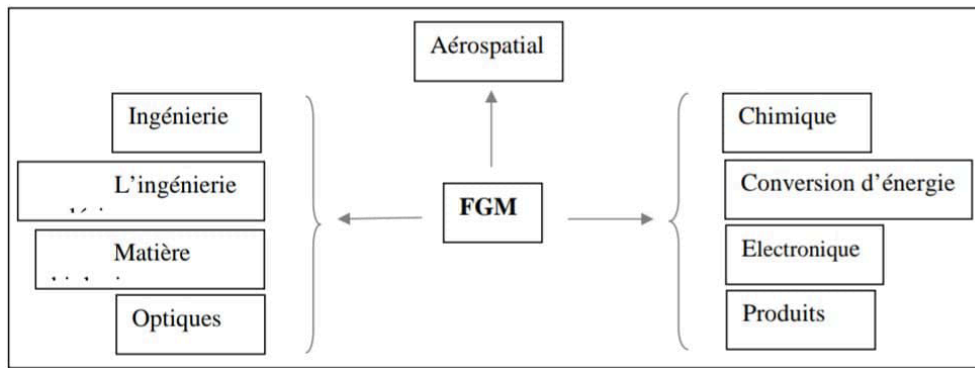
#### **D) Énergie nucléaire:**

Les FGM sont utilisés dans les dispositifs de conversion d'énergie. Ils fournissent également une barrière thermique et ils sont utilisés comme revêtement de protection sur des aubes de turbine dans le moteur à turbine à gaz et aussi dans le générateur thermoélectrique, pile à combustible, réacteurs nucléaires, pastilles de combustible.

#### **E) Optoélectronique:**

Les FGM trouvent aussi leur application dans l'optoélectronique comme les matériaux à indice de réfraction gradués et des disques audio-vidéo; support de stockage magnétique, semi-conducteur à bande graduée. Autres domaines d'application sont: produits (matériaux de constructions, corps de voiture, verres de fenêtre), conversion d'énergie (générateur thermoélectrique, convertisseur thermoionique, pile à combustible), optiques (fibres optiques, lentilles), matières biologiques (implants, peau artificielle), chimique (échangeur de chaleur, tube de chaleur, récipient de réaction) (Hassina.Z.2017).



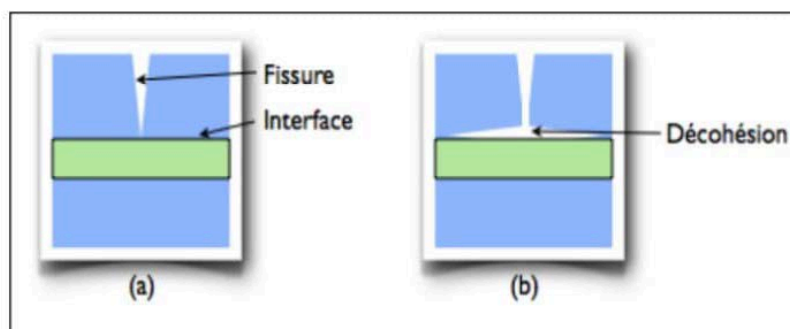


**Figure III.18 :** Les principaux domaines d'application des FGM

### III.10. Comparaison des matériaux types FGM et les matériaux composites classiques:

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 macroscopiquement inhomogènes. Le changement continu dans la composition et donc dans la microstructure du matériau distingue les F.G.M des matériaux composites conventionnels (Koizumi.M 1992). Il en résulte un gradient qui déterminera les propriétés matérielles des FGM. Dans certains cas, on peut avoir un FGM constitué d'un même matériau mais de microstructure différente (Boch.1986).

Le concept FGM peut être appliqué dans divers domaines pour des usages structuraux et fonctionnels. Au Japon, plusieurs programmes de cinq ans 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 spatial hypersonique) 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.

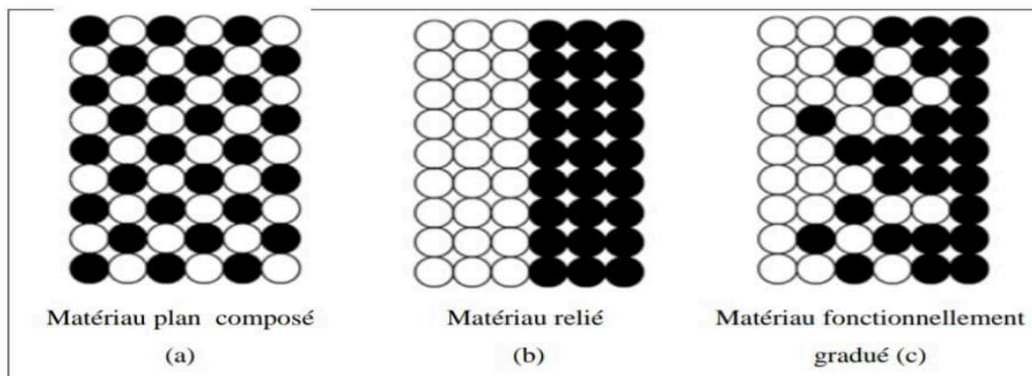


**Figure III.19 :** Le rôle de l'interface sur la ténacité des composites

Lorsqu'une fissure atteint l'interface (a), elle est déviée (b),. Au lieu d'une rupture brutale, on observe donc une décohésion progressive des constituants.

**Tableau III.1:** Caractéristiques des matériaux composites FGM en comparaison avec les matériaux composites conventionnels

	exemple	FGM	Non-FGM
propriétés	- - - Résistance mécanique — Conductivité thermique		
structure	Elément constituants : Céramique ○ Métal ● Microporosité ◊ fibre ✱		



**Figure III.20 :** La distribution des composants des matériaux (Ait Taleb.S.2016).

### III.11. Lois régissant la variation des propriétés matérielles des FGM:

Les matériaux à gradient fonctionnel « FGM » consistent en l'association de deux ou plusieurs matériaux aux propriétés structurales et fonctionnelles différentes avec une transition idéalement continue de la composition, de la structure et de la distribution des porosités entre ces matériaux de manière à optimiser les performances de la structure qu'ils constituent.

Les caractéristiques les plus distinctes des matériaux FGM sont leurs microstructures non uniformes avec des macro-propriétés graduées dans l'espace. Un des paramètres clé à déterminer lors de la fabrication de ces matériaux est la composition multi phase à travers l'épaisseur. La dépendance des propriétés de la position se traduit par la prise en compte de la loi des mélanges correspondant au modèle de Voigt

$$P_F = \sum_{i=1}^n P_i V_{Fi} \quad (III-1)$$

Où  $P_i$  et  $V_{Fi}$  sont respectivement les propriétés du matériau et la fraction volumique du matériau constitutif  $i$  avec la somme des fractions volumiques de tous les matériaux constituants donne l'unité 1 :

$$\sum_{i=1} V_{Fi}=1 \quad (\text{III-2})$$

Dans la pratique, la plupart des structures FGM sont à deux constituants : de la céramique et du métal inoxydable en général (Fig.I.13). Dans ce cas, la loi de Voigt se réduit à :

$$P=P_c V_c+P_m V_m \quad (\text{III-3})$$

$P$ : Propriété le long de l'axe  $z$ ;

$P_m$ : La propriété mécanique du métal;

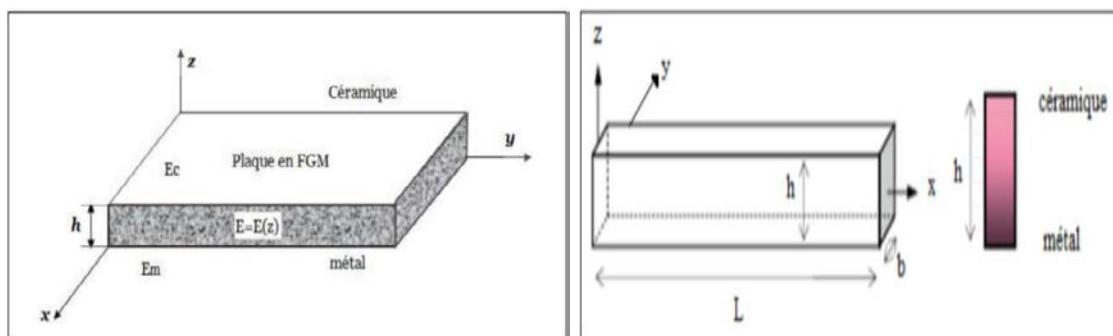
$P_c$ : La propriété mécanique de la céramique;

$V_m$ : La fraction volumique du métal;

$V_c$ : La fraction volumique de la céramique.

Avec:  $V_c+V_m=1$

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



**Figure III.21:** Géométrie d'une plaque FGM.

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

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

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

### III.11.1. Propriétés matérielles de la plaque P-FGM:

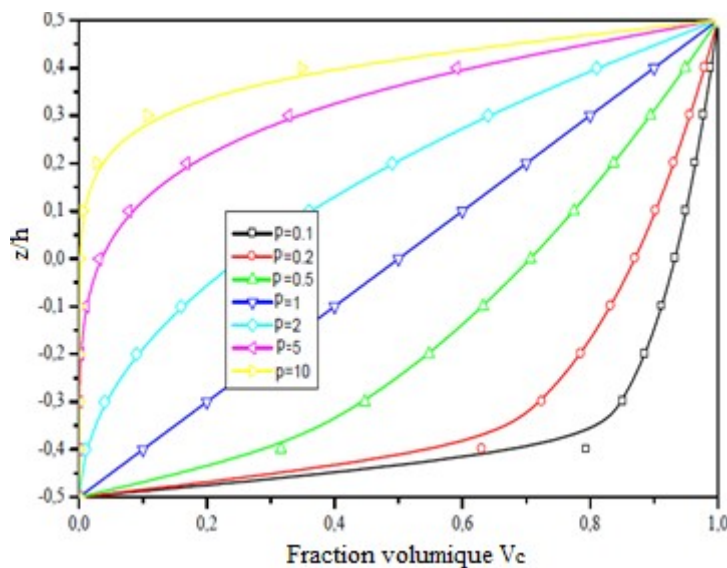
La fraction volumique de la classe P-FGM obéit à une fonction en loi de puissance :

$$V(z) = \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^k \quad (\text{III-5})$$

Où  $p$  est un paramètre matériels et  $h$  est l'épaisseur de la poutre. Une fois la fraction volumique locale ( $z$ ) à été définie, les propriétés matérielles d'une poutre P-FGM peuvent être déterminées par la loi des mélanges:

$$E(z) = (E_c - E_m)V_c(z) + E_m \quad (\text{III-6})$$

Où  $E_c$  et  $E_m$  sont respectivement les modules de Young de la surface supérieure ( $z = +h/2$ ) et de la surface inférieure ( $z = -h/2$ ) de la poutre FGM.



**Figure III.22 :** Variation de la fraction volumique à travers l'épaisseur P-FGM

La variation de la fraction volumique dans la direction d'épaisseur de la poutre P-FGM est représentée sur la (Fig.III.22). Il apparaît clairement que cette dernière change rapidement près de surface inférieure pour  $p < 1$ , et augmenté rapidement près de la surface supérieure pour  $p > 1$ .

### III.11.2. Propriétés matérielles de la plaque S-FGM:

Dans le cas d'ajouter une plaque P-FGM d'une simple fonction de loi de puissance à une plaque composite multicouche, les concentrations des contraintes apparaissent sur l'interfaces où le matériau est continu mais change rapidement. Par conséquent, Chung et chi (2003) ont défini la fraction de volume de la plaque FGM en utilisant deux fonctions de loi de puissance pour assurer une bonne distribution des contraintes parmi toutes les interfaces. Les deux fonctions de loi de puissance sont définis par :

$$V_c(z) = \frac{1}{2} \left( \frac{\frac{h}{2} + z}{\frac{h}{2}} \right)^k \quad \text{pour : } -h/2 \leq z \leq 0 \quad (\text{III-7a})$$

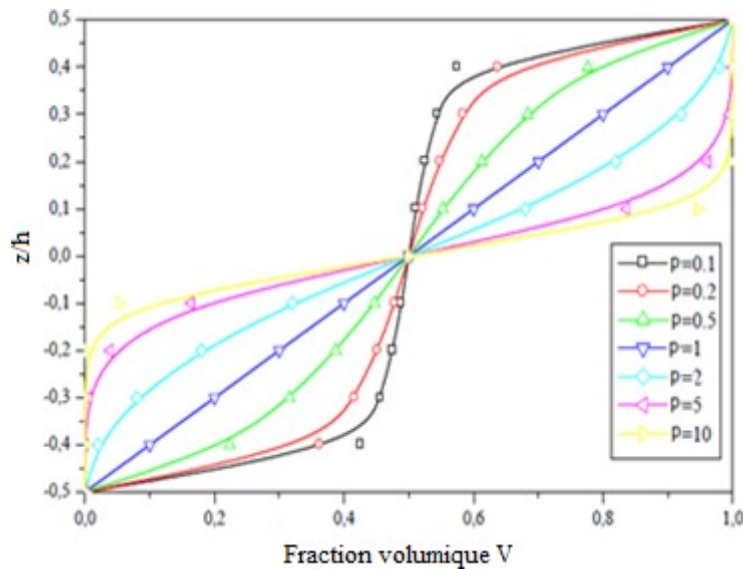
$$V_m(z) = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\frac{h}{2} - z}{\frac{h}{2}} \right)^k \quad \text{pour : } 0 \leq z \leq h/2 \quad (\text{III-7b})$$

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

$$E(z) = V_c(z)E_c + (1 - V_c(z))E_m \quad \text{pour : } -h/2 \leq z \leq 0 \quad (\text{III-8a})$$

$$E(z) = V_m(z)E_m + (1 - V_m(z))E_c \quad \text{pour : } 0 \leq z \leq h/2 \quad (\text{III-8b})$$

La (Fig.III.23) montre que la variation de la fraction volumique définie par les équations (III-7a) et (III-7b) représente les distributions sigmoïdes, et cette poutre FGM est appelée (Poutre S-FGM).



**Figure III.23:** Variation de la fraction volumique à travers l'épaisseur (S-FGM).

### III.11.3. Les propriétés matérielles de la poutre E-FGM :

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

$$E(z) = E_m e^{B(z+h/2)} \quad (\text{III-9})$$

$$B = \frac{1}{h} \ln(E_c/E_m) \quad (\text{III-10})$$

La variation du module de Young à travers l'épaisseur de la plaque E-FGM est représentée sur la (Fig.III.24).

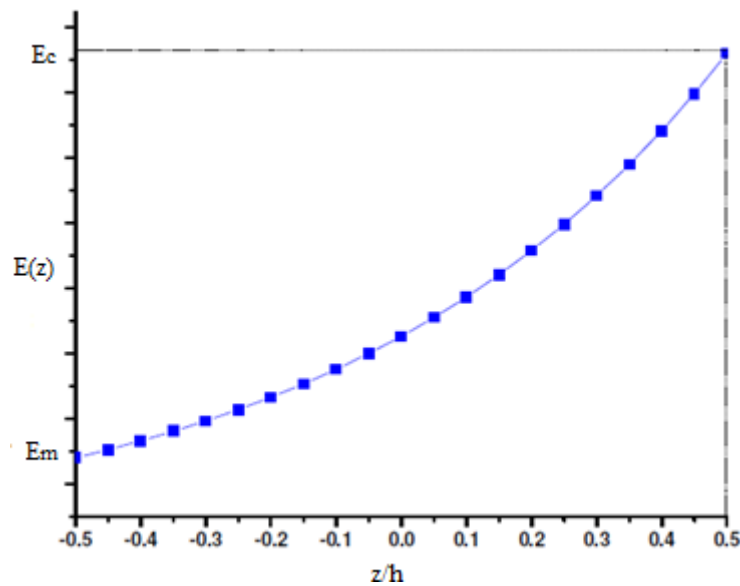


Figure III.24: Variation du module de Young à travers l'épaisseur (E-FGM)

### III.12. Conclusion:

Les matériaux FGM sont des excellents matériaux de pointe qui vont révolutionner le monde de la fabrication, ils ont été développés en combinant des matériaux d'ingénierie avancée sous forme de particules, de fibres, ou de plaquettes. Le changement continu de leurs propriétés a pour but d'améliorer les performances structurelles, ils sont développés pour adapter une structure du matériau à l'échelle microscopique afin d'optimiser certaines propriétés fonctionnelles et améliorer des propriétés spécifiques dans la direction préférée, les rendant ainsi meilleurs que les matériaux homogènes constitués de composants similaires. Ce chapitre présente un aperçu sur ces matériaux et l'historique de leur origine, les différentes méthodes de fabrication ont été mis en évidence, Leurs domaines d'application sont également présentés, ces derniers qui peuvent être améliorés et élargies en abaissant les coûts de fabrication et en améliorant les méthodes d'élaboration.

Chapitre IV:  
Renforcement en  
cisaillement des poutres en  
BA par matériaux  
composites

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

La technique des armatures collées en matériaux composites acquiert une importance croissante dans le domaine du renforcement des structures. Elle s'avère notamment intéressante pour le renforcement et la réparation des structures en béton, en charpente ou en maçonnerie. Cependant hormis les avantages qu'elle procure, la technique de renforcement par les matériaux composites, engendre une diminution dans la ductilité des éléments renforcés en flexion et sans confinement notable. Sachant que la ductilité est un élément désirable.

Triantafillou et Plevris (1998), ont démontré que le renforcement des facettes de poutres en béton armé par des fibres de verre ou d'aramides, améliore leur résistance au cisaillement et leur ductilité. Et récemment Guido Camata et al, (2007) ont montré expérimentalement et analytiquement l'efficacité de la surface de contact du renfort composite sur la ductilité. Dans ce sens la présente étude évalue l'influence et l'efficacité du renforcement externe des poutres en béton armé, par un renfort en fibre de verre et de carbone, et cela par une configuration de renforcement appropriée. Différentes solutions sont expérimentées, Elles combinent l'usage séparé de fibres de carbone et de verre unidirectionnel avec un ancrage en U. Dans les mêmes conditions un tissu hybride bidirectionnel verre-carbone est testé. Et dans ce sens et pour réduire le coût et assurer un comportement relativement plus ductile pour les éléments en béton armé renforcé, l'addition des fibres de verre pourrait être considérée comme solution de rechange, Attari et al, (2010), puisqu'elles sont relativement plus déformable et meilleur marché que la fibre de carbone.

Le cisaillement en soit est un phénomène dont les mécanismes ne sont pas tout à fait maîtrisés eu égard aux différents paramètres qui interviennent tels que : la résistance du béton, la limite élastique de l'acier d'armature, la section des barres d'armature longitudinale et transversale, l'espacement des étriers, la position du chargement, etc, (Diagana et al, 2003), À cela s'ajoutent d'autres paramètres liés au renfort : sa rigidité, sa configuration ainsi que des paramètres d'interaction renfort-béton et renfort-étriers. De ce fait, on constate des écarts entre les prédictions avancées par les normes et les résultats d'essais menés dans les laboratoires de recherche (Bousselham, 2005).

Ce chapitre porte sur une étude analytique pour déterminer la contribution des plaques de renforcement en cisaillement d'une poutre en béton armé renforcées sur sa partie latérale par matériaux composites. Deux modèles de calcul sont présentés dans cette partie basée sur le code BAEL et l'analogie de Morch. La plaque de renforcement utilisée est en matériaux



composites classiques (FRP) et avancés (FGM). L'effet de la variation du taux de distribution de porosité est également pris en considération dans ce travail.

## IV.2. Calcul de la contribution des plaques composites en cisaillement:

### IV.2.1. Modèles théoriques existants:

#### IV.2.1.1. Modèle de Triantafillou:

Le modèle de Triantafillou (1998) est l'un des premiers modèles proposés et est basé sur l'analogie du treillis. Les dérivations sont basées sur l'analyse de régression de tests expérimentaux réalisée et affinée après deux ans avec des résultats plus expérimentaux (Triantafillou et Antonopoulos, 2000). Les équations présentées, Eqs. (IV-1), (IV-2) et (IV-3) sont adaptés pour une conception technique simple et rapide, mais en raison des données limitées disponibles à ce moment-là, les prédictions du modèle sont insatisfaisantes dans certains cas. Malheureusement, le modèle ne prend pas en compte la configuration de renforcement par collage latéral. La déformation définie dans l'équation (IV-2) est la déformation effective dans les fibres pour la rupture du CFRP pour une poutre entièrement enveloppée, tandis que la déformation dans l'équation (IV-3) est la déformation effective dans les fibres pour le décollement du CFRP pour un U enveloppé faisceau. Il faut être prudent lors de l'application de ces deux équations car la régression sur la rigidité axiale a été effectuée en utilisant les unités GPa.

$$V_{frp} = \frac{0.9}{\gamma_{frp}} \rho_{frp} E_{frp} \varepsilon_{fro.e} b_w d (1 + \cot \beta) \sin \beta \quad (IV - 1)$$

$$\varepsilon_{-fpr.e} = 0.17 \varepsilon_{frp.u} \left( \frac{f_c^{2/3}}{E_{frp} \rho_{frp}} \right)^{0.3} \quad (IV - 2)$$

$$\varepsilon_{frp.e} = \min \left[ 0.65 \left( \frac{f_c^{2/3}}{E_{frp} \rho_{frp}} \right)^{0.56} \times 10^{-3}; 0.17 \varepsilon_{frp.u} \left( \frac{f_c^{2/3}}{E_{frp} \rho_{frp}} \right)^{0.30} \right] \quad (IV - 3)$$

#### IV.2.1.2. Modèle de Chen et Teng:

Un travail approfondi réalisé par Chen et Teng (2001, 2003a et 2003b) a abouti à l'un des modèles de cisaillement les plus utilisés. L'équation générale (IV-4) est basée sur la théorie du modèle en treillis, avec les remarques que les bandes de FRP discrètes ont été modélisées comme des feuilles/plaques de FRP continues équivalentes, et un facteur de réduction pour la contrainte est utilisé (IV-5).

$$T_{frp} = 2f_{frp.e}t_{frp}w_{frp} \frac{h_{frp.e}(\cot\theta + \cot\beta)\sin\beta}{s_{frp}} \quad (IV - 4)$$

$$f_{frp.e} = D_{frp}\sigma_{frp.max} \quad (IV - 5)$$

Le facteur de distribution des contraintes est déterminé analytiquement en intégrant les contraintes/déformations sur la section transversale de la poutre Eq. (IV-6). Max. Pour la rupture des fibres, différentes formes de distribution non linéaire des contraintes sont analysées et la forme finale est exprimée en fonction des limitations géométriques comme dans l'équation (IV-7).

$$D_{frp} = \frac{\int_{z_t}^{z_b} \sigma_{frp.z} dz}{h_{frp.e}\sigma_{frp.max}} \quad Ou = \frac{\int_{z_t}^{z_b} \varepsilon_z dz}{h_{frp.e}\varepsilon_{max}} \quad (IV - 6)$$

$$D_{frp} = \frac{1 + \zeta}{2} \quad Ou \quad \zeta = z_t/z_b \quad (IV - 7)$$

$z_t = (0.1d + d(fr.p.t)) - 0.1d = d(fr.p.t)$ , Coordonnée de l'extrémité supérieure du FRP effectif (IV-8).

$z_b = 0.9d$ , Coordonnée de l'extrémité inférieure du FRP effectif (IV-9)

$$\sigma_{frp.max} = \begin{cases} f_{frp}/1 \\ \frac{0.4273}{1} \beta_w \beta_L \sqrt{\frac{E_{frp}}{t_{frp}} \sqrt{f'c}} \end{cases} \quad (IV - 10)$$

$$\beta_L = \begin{cases} 1 & si \lambda \geq 1 \\ \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) & si \lambda < 1 \end{cases} \quad (IV - 11)$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - w_{frp}/(s_{frp}\sin\beta)}{1 + w_{frp}/(s_{frp}\sin\beta)}} \quad (IV - 12)$$

$$\lambda = \frac{L_{max}}{L_e}; L_{max} = \frac{h_{frp.e}}{\sin\beta} \quad (IV - 13)$$

$$L_{max} = \frac{h_{frp.e}}{(2\sin\beta)} \quad (IV - 14)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_{frp}t_{frp}}{\sqrt{f'c}}} \quad (IV - 14)$$

$$D_{frp} = \begin{cases} \frac{2}{\pi\lambda} \frac{1 - \cos \frac{\pi}{2} \lambda}{\sin \frac{\pi}{2} \lambda} & \text{si } \lambda \leq 1 \\ 1 - \frac{\pi - 2}{\pi\lambda} & \text{si } \lambda > 1 \end{cases} \quad (\text{IV} - 15)$$

$$\sigma_{frp.max} = \begin{cases} 0.8 f_{frp} / \gamma_{frp} \\ \frac{0.3}{\gamma_b} \beta_w \beta_L \sqrt{\frac{E_{frp}}{t_{frp}}} \sqrt{f_c} \end{cases} \quad (\text{IV} - 16)$$

#### IV.2.1.3. Modèle de Carolin et Täljsten (2005) et Sas et al. (2008):

Ce modèle de renforcement au cisaillement a été présenté dans Carolin (2003), Carolin et Täljsten (2005) et Sas et. al (2008). Le principe de superposition a été utilisé pour dériver les équations du modèle dans lequel la capacité de cisaillement totale de la poutre est considérée comme :

$$V_{Rd} = V_c + V_s + V_p + V_i + V_{frp} \quad (\text{IV-17})$$

Où :  $V_c$ , est la capacité du béton, et peut être déterminée selon les normes en vigueur,  $V_s$ , est la contribution des étriers peut également être déterminée selon les normes en vigueur,  $V_p$ , contribution des charges axiales comme la précontrainte,  $V_i$ , d'autres contributions (par exemple câbles de compression inclinés),  $V_{FRP}$  la contribution du composite collé extérieurement.

La contribution du composite à liaison externe a été traitée à l'aide de la formule suivante.

$$V_{FRP} = \eta_{frp} \cdot \varepsilon_{cr} \cdot E_{frp} \cdot t_{frp} \cdot r_{frp} \cdot z \cdot \frac{\sin(\theta + \beta)}{\sin\theta} \quad (\text{IV} - 18)$$

Le facteur de réduction  $\eta_{frp}$  a été tenu compte de la distribution non uniforme des contraintes sur la section transversale et a été initialement dérivé par Popov (1998) (Eq. (IV-19)). Une valeur de 0,6 a été suggérée pour être utilisé.

$$\eta_{frp} = \frac{\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \varepsilon_{frp}(Y) dy}{\varepsilon_{frp.max} \cdot h} \quad (\text{IV} - 19)$$

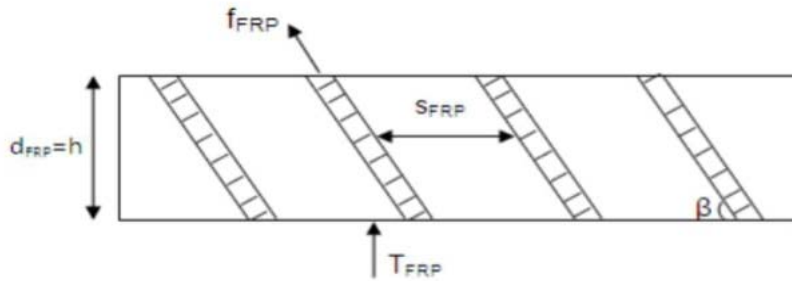
$$\varepsilon_{cr} = \min \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{frp.u} \\ \varepsilon_{bond} \cdot \sin^2(\theta + \beta) \\ \varepsilon_{c.max} \sin^2(\theta + \beta) \end{array} \right\} \quad (\text{IV} - 20)$$

$$\varepsilon_{bond} = \frac{1}{E_{frp} t_{frp}} \sqrt{2E_{frp} t_{frp} G_f} \begin{cases} \sin(\omega L_{cr}) & \text{pour } L_{cr} \leq \frac{\pi}{2\omega} \\ 1 & \text{pour } L_{cr} > \frac{\pi}{2\omega} \end{cases} \quad \text{Ou: } \omega$$

$$= \sqrt{\frac{\tau_{max}^2}{2E_{frp} t_{frp} G_f}} \quad (IV - 21)$$

$$r_{frp} = \begin{cases} \sin\beta \\ \frac{w_{frp}}{s_{frp}} \end{cases} \quad (IV - 22)$$

#### IV.2.2. Détermination de la contribution des plaques composites en cisaillement basant sur code BAEL:



**Figure IV.1 :** Géométrie d'une section transversale d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par des plaques composites

La contrainte tangente (contrainte de cisaillement) dans la section où se produit l'effort tranchant sera donnée par l'équation suivante :

$$\tau_U = \frac{T_U}{b \cdot d} \quad (IV - 23)$$

$$\text{Projection verticale : } f_{FRP} = A_{FRP} \cdot \sigma_{FRP} (\sin\beta + \cos\beta) \quad (IV - 24)$$

Soit  $m$  le nombre de cours de section  $A_{FRP}$  travaillant à  $\sigma_{FRP}$  pour équilibrer un effort  $T_{FRP}$

$$m = \frac{d_{FRP}(1 + \cot\beta)}{s_{FRP}} \quad \text{Et} \quad m \cdot A_{FRP} \cdot \sigma_{FRP} = \frac{T_{FRP}}{\sin\beta}$$

D'où :

$$T_{FRP} \geq \frac{A_{FRP} \cdot d_{FRP} \cdot \sigma_{FRP} (\sin\beta + \cos\beta)}{s_{FRP}} \quad (IV - 25)$$

Avec:

$$A_{frp} = 2 \cdot t_{FRP} \cdot b_{FRP} \quad (IV - 26)$$

$T_{FRP}$ ,  $B_{FRP}$  sont l'épaisseur et la largeur de la plaque de renforcement respectivement.

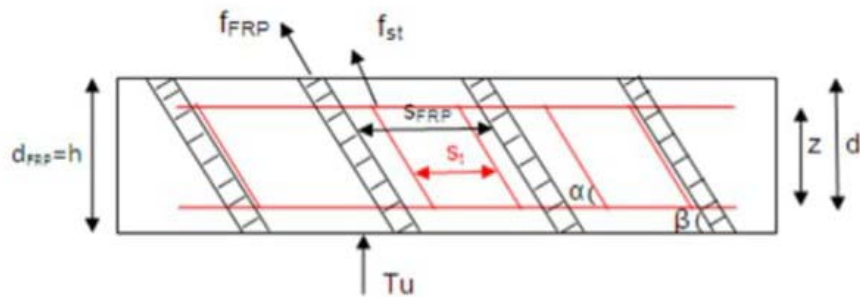
Avec:

$$\varepsilon_{fpr.e} = 0.17 \varepsilon_{fpr.u} \left( \frac{f_c^{2/3}}{E_{fpr} \rho_{fpr}} \right)^{0.3} \quad \text{Dans le cas de la rupture de la plaque}$$

$$\varepsilon_{fpr.e} = \min \left[ 0.65 \left( \frac{f_c^{2/3}}{E_{fpr} \rho_{fpr}} \right)^{0.56} \times 10^{-3} \right] \quad \text{Dans le cas de décollement de la plaque}$$

#### IV.2.2.1. Justification des poutres renforcées sous sollicitation tangentes:

Pour le dimensionnement d'une poutre en cisaillement renforcé par plaque composite on adoptera la démarche suivante :



**Figure IV.2:** Géométrie d'une section transversale d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par des armatures transversales et des plaques composites

$$T_U = T_{st} + T_{FRP} + T_b$$

La contribution du béton  $T_b$  en cisaillement est négligeable. Par la projection verticale on obtient l'effort repris par les étriers et les plaques composites.

$$T_{st} = f_{st} \cdot \sin \alpha \quad (IV - 27)$$

$$T_{fpr} = f_{FRP} \cdot \sin \beta \quad (IV - 28)$$

Soit  $n$  et  $m$  le nombre de cours de section  $A_{st}$  et  $A_{FRP}$  travaillant à  $\sigma_{st}$  et  $\sigma_{FRP}$  pour équilibrer un effort global:

$$n = \frac{z(1 + \cot \alpha)}{s_t} \quad ; \quad m = \frac{d_{FRP}(1 + \cot \beta)}{S_{FRP}} \quad (IV - 29)$$

Et:

$$n \cdot A_{st} \cdot \sigma_{st} + m \cdot A_{FRP} \cdot \sigma_{FRP} = \frac{T_{st}}{\sin \alpha} + \frac{T_{FRP}}{\sin \beta} \quad (IV - 30)$$

En remplaçant toutes ces forces et en faisant la transformation nécessaire on obtient:

$$A_{FRP} = \left[ \left( \frac{T_{st}}{\sin\alpha} + \frac{T_{FRP}}{\sin\beta} \right) - A_{st} \cdot \sigma_{st} \cdot z \left( \frac{1 + \cot\alpha}{s_t} \right) \right] \cdot \frac{S_{FRP}}{\sigma_{FRP} \cdot d_{FRP} (1 + \cot\beta)} \quad (IV - 31)$$

Si l'inclinaison des bandes égales à l'inclinaison des étriers ( $\alpha=\beta$ ) la formule devienne:

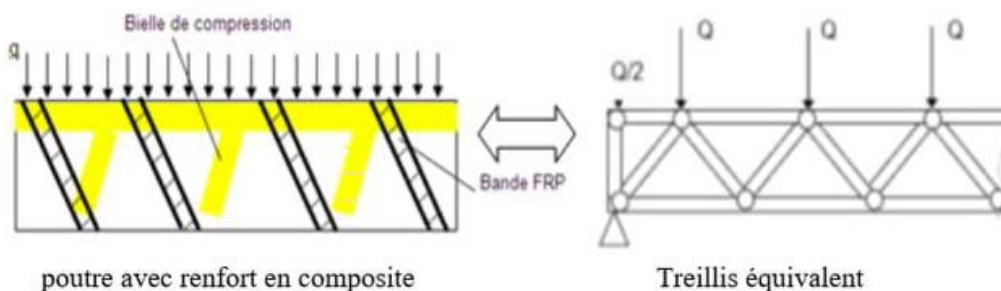
$$A_{FRP} \left[ \left( \frac{T_U}{\sin\alpha} \right) - A_{st} \cdot \sigma_{st} \cdot z \left( \frac{1 + \cot\alpha}{s_t} \right) \right] \cdot \frac{S_{FRP}}{\sigma_{FRP} \cdot d_{FRP} (1 + \cot\beta)} \quad (IV - 32)$$

Avec:

$$T_U = T_{st} + T_{FRP} \quad (IV - 33)$$

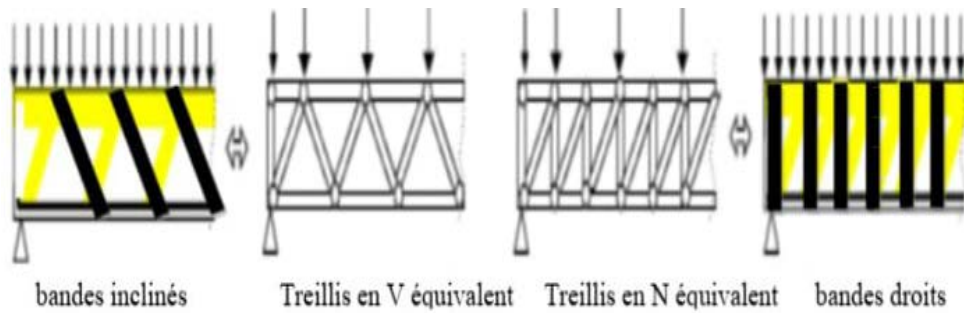
### IV.2.3. Détermination de la contribution des plaques composites en cisaillement basant sur l'analogie de Morsch :

Pour équilibrer les équations, on se base sur l'analogie de Morsch qui consiste à comparer le fonctionnement d'une poutre en béton armé à celui d'une poutre fictive en treillis, mais dans ce cas on comparant le fonctionnement d'une poutre renforcée par des plaques composites à celui d'une poutre fictive en treillis.



**Figure IV.3:** Analogie d'une poutre renforcée à un treillis équivalent

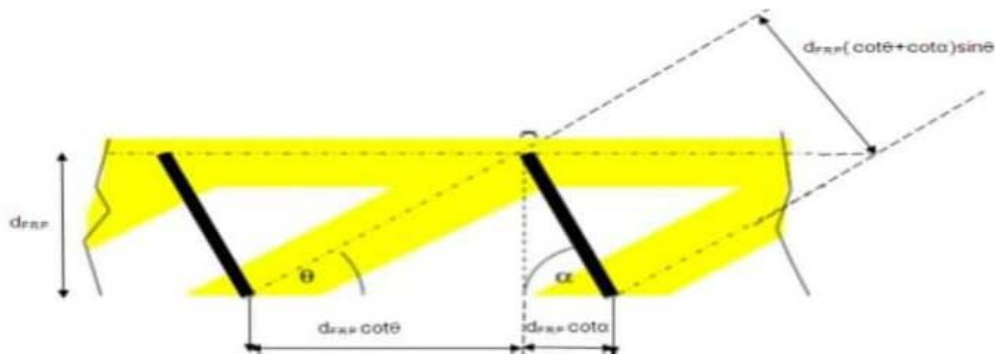
La membrure supérieure de la poutre fictive correspond à la zone de compression dans le béton tandis que la membrure inférieure correspond à l'armature tendue. Les diagonales comprimées du treillis correspondant aux "bielles" de compression dans l'âme de la poutre en béton et les diagonales tendues correspondant aux bandes d'effort tranchant. Partant de ce théorème, il n'existe pas un treillis unique auquel on doit se référer mais bien une infinité de modèles dépendant de la dimension des diagonales de béton et des bandes, de leur inclinaison. treillis en N dont la correspondance de disposition verticale des bandes dans une poutre en béton est plus conventionnelle et tout aussi acceptable pour reprendre l'effort tranchant au vu du théorème statique.



**Figure IV.4 :** Analogie des poutres renforcées avec des bandes en différentes inclinaisons

#### IV.2.3.1. Équilibre des forces :

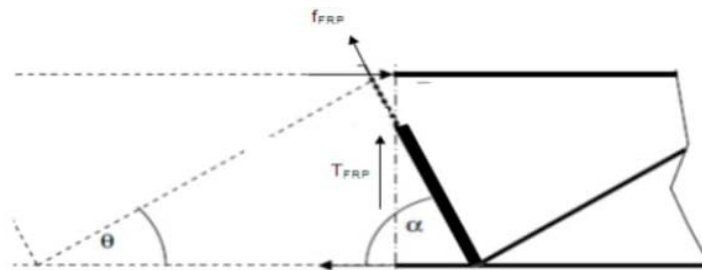
Les formules de dimensionnement ou de contrôle sont rétablies sur l'équilibre des efforts dans l'âme. Nous fixons ces formules dans le cas général d'angles  $\theta$  (inclinaison de la bielle de béton) et  $\alpha$  (inclinaison de la bande) quelconques.



**Figure IV.5 :** Poutre renforcée transversalement par des plaques composite

#### IV.2.3.2. Vérification de la traction dans les bandes :

Faisons à présent une coupe dans les bandes en voilant à couper une bande. L'équilibre vertical nous donne l'effort de traction dans la bande :



**Figure IV.6 :** Coupe d'une plaque composite

$$t_{FRP} = \frac{T_{FRP}}{\sin \alpha} \quad (IV - 34)$$

Si  $A_{FRP}$  représente la section coupée dans la bande (c.-à-d: si la bande est sur les deux côtés, la section de 2 bandes) et que les bandes sont écartées d'un "pas" ou entre distance de " $S_{FRP}$ ", la section résistance par panneau, soit une longueur égale a:

$$d_{FRP}(cot\theta + cot\alpha) V_{qut} \frac{A_{FRP} \cdot d_{FRP}(cot\theta + cot\alpha)}{S_{FRP}} \quad (IV - 35)$$

$$T_{FRP} = \frac{A_{FRP} \cdot d_{FRP} \cdot \sigma_{FRP}(cot\theta + cot\alpha) \sin\alpha}{S_{FRP}} \quad (IV - 36)$$

### IV.3. La plaque composite de renforcement:

La plaque de renforcement est considérée en FRP et en FGM. La plaque FGM est constituée d'un mélange de métal et de céramique, dont la composition varie de la surface supérieure à la surface inférieure. Le matériau des surfaces supérieure et inférieure est respectivement en céramique et en métal.

Les propriétés matérielles des plaques de renfort FGM sont supposées varier en continu à travers l'épaisseur de la plaque. Dans cette enquête, la plaque imparfaite est supposée avoir des porosités s'étalant dans l'épaisseur en raison d'un défaut pendant la production. Considérons un FGM imparfait avec une fraction volumique de porosité, ( $\alpha < 1$ ), répartie uniformément entre le métal et la céramique, la règle de mélange modifiée proposée par Wattanasakulpong al. (2014) est utilisé comme :

$$E(z) = E_c \left( V_c - \frac{\alpha}{2} \right) + E_m \left( V_m - \frac{\alpha}{2} \right) \quad (IV.37)$$

Maintenant, la fraction volumique totale du métal et de la céramique est :  $V_m + V_c = 1$ , et la loi de puissance de la fraction volumique de la céramique est décrite comme :

$$V_c = \left( \frac{z_p}{h_p} + \frac{\alpha}{2} \right)^k \quad (IV.38)$$

Par conséquent, le module d'Young de la plaque FGM imparfaite peut être écrit comme l'équation (Type I). Wattanasakulpong al. (2014) ont considéré que les pores sont répartis de manière identique dans la céramique et le métal (50%-50%). Pour une distribution de porosité non identique, les équations du module d'Young deviennent comme les équations (Types: II, III, IV et V).



**Tableau IV.1:** les différents types des porosités

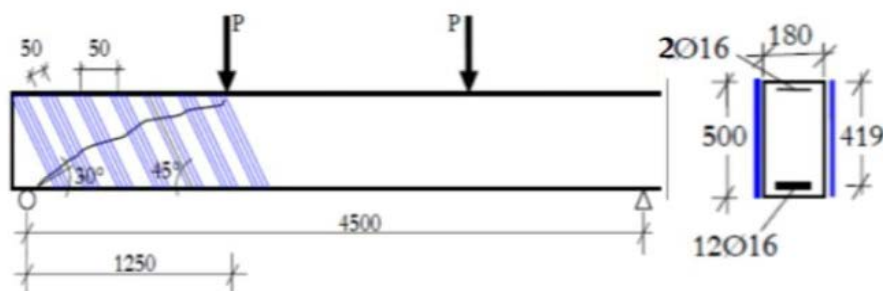
Type	Taux de distribution de porosité		Module de Young
	Céramique	Métal	
Type-I	Sans porosité		$E(z) = (E_c - E_m) \left( \frac{z_p}{h_p} + \frac{1}{2} \right)^k + E_m$
Type-II	50%	50%	$E(z) = (E_c - E_m) \left( \frac{z_p}{h_p} + \frac{1}{2} \right)^k + E_m - (E_c + E_m) \frac{\alpha}{2}$
Type-III	60%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

$E_c$  et  $E_m$  sont le module d'Young de la céramique et du métal.  $h_p$  est l'épaisseur de la plaque de renforcement.  $k$  est l'indice de loi de puissance qui prend des valeurs supérieures ou égales à zéro. La plaque FGM est une plaque entièrement en céramique lorsque  $k$  est mis à zéro et complètement métallique pour une grande valeur de  $k$ .

#### IV.4. Résultats et discussions:

Les deux modèles présentés ci-dessous ont été validés par une comparaison des résultats obtenus avec les modèles de: Triantafillou; Chen et Teng; Carolin, Täljsten et Sas, pour le même modèle d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement.

Les caractéristiques géométriques et les propriétés mécaniques des matériaux utilisés sont représentées dans le tableau IV.1.



**Figure IV.7 :** Géométrie d'une poutre en béton armé renforcée transversalement par des plaques composites (Sas, G. 2008).

**Tableau IV.2:** Caractéristiques et propriétés mécanique des matériaux utilisées

Notation	Valeurs	Unité
$f_{cu}$	67	MPa
$d$	419	Mm
$b$	180	Mm
$h$	500	Mm
$w$	50	Mm
$s$	50	Mm
$\beta$	45	[°]
$A_{frp}$	170	--
$\rho_{frp}$	0.001	[mm <sup>2</sup> ]
$T_{frp}$	0.09	[mm]
$E_s$	210	GPa
$\sigma_e$	500	MPa
$A_s$	2413	mm <sup>2</sup>
$A_{sc}$	402	mm <sup>2</sup>
$E_{FRP}$	234	GPa
$\sigma_{FRP}$	3150	MPa
$\varepsilon_{FRP}$	0.015	--
$d_{FGM}$	500	Mm
$d$	81	Mm

Le tableau IV.3 présente une comparaison des résultats de la contribution en cisaillement des plaques de renforcement composites avec Carolin, Täljsten et Sas, Chen et Teng et Triantafillou. La poutre est considérée en béton armé simplement appuyée. La plaque de renforcement est considérée en FRP et en FGM. La combinaison de la plaque FGM est en Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou l'indice de puissance varie de 0, 5, 10 et ∞. A partir de ce tableau on peut constater que les contributions des plaques composite FRP pour les deux modèles présentés sont plus proches par rapport au modèle de Chen et Teng. On peut également remarquer que la contribution de la plaque de renforcement en FGM devient plus faible avec l'augmentation de l'indice de puissance  $k$ .

**Tableau IV.3 :** Comparaison de la contribution en cisaillement d'une poutre renforcée en cisaillement par une plaque composite

Modèle de calcul	Plaque de renforcement		La contribution des plaques de renforcement ( T) KN	
			Rupture de la plaque de renforcement	Décollement par fissuration
<b>Carolin, Täljsten et Sas</b>	FRP		138.1	106.8
<b>Chen et Teng</b>	FRP		206.36	127.1
<b>Triantafillou</b>	FRP		213.15	164.3
<b>Modèle 01 BAEL</b>	FRP		205.33	136.34
	FGM	k=0	288.30	168.76
		k=5	118.29	96.40
		k=10	90.49	81.46
		k= $\infty$	88.22	80.17
<b>Modèle 02 Analogie de Morch</b>	FRP		205.41	136.40
	FGM	k=0	288.42	168.83
		k=5	118.33	96.44
		k=10	90.52	81.49
		k= $\infty$	88.25	80.20

L'effet de la résistance à la compression du béton sur la contribution des plaques composites en cisaillement d'une poutre en béton armé renforcée sur sa partie latérale dans les cas de rupture et de décollement de la plaque de renforcement est montré dans les tableaux IV.4 et IV.5, respectivement. Différentes résistances à la compression du béton sont pris en considération à savoir:  $f_c=30, 35, 40$  et  $45$  MPa. Les résultats trouvés montrent que la contribution des plaques de renforcement augmente avec l'augmentation de la résistance caractéristique du béton.

Les tableaux IV.6 et IV.7 présentent l'effet de l'espacement entre les plaques composites sur leurs contributions en cisaillement des poutres en béton armé renforcées. L'espacement entre les plaques de renforcement est pris égal:  $S=40, 50, 60$  et  $70$ mm. On peut voir à partir de ces

tableaux qu'au fur et à mesure que l'espacement  $S$  augmente, la contribution des plaques composite devient plus petite. La contribution de la plaque de renfort au point de rupture de la plaque est supérieure à celle en cas de décollement.

**Tableau IV.4 :** Effet de la résistance caractéristique du béton sur la contribution en cisaillement des plaques de renforcement - Cas de rupture de la plaque de renforcement

Modèle de calcul		La contribution des plaques de renforcement ( T ) KN			
		Rupture de la plaque de renforcement			
		$f_c = 30\text{MPa}$	$f_c = 35\text{MPa}$	$f_c = 40\text{MPa}$	$f_c = 45\text{MPa}$
<b>Triantafillou</b>		175.21	179.70	184.19	188.67
<b>Modèle 01 BAEL</b>	<b>FRP</b>	174.85	180.32	185.20	189.62
	<b>FGM-k=5</b>	100.73	103.88	106.70	109.24
	<b>FGM-k=10</b>	77.06	79.47	81.62	83.56
<b>Modèle 02 Analogie de Morch</b>	<b>FRP</b>	174.92	180.39	185.28	189.69
	<b>FGM-k=5</b>	100.76	103.93	106.74	109.28
	<b>FGM-k=10</b>	77.08	79.50	81.65	83.60

**Tableau IV.5 :** Effet de la résistance caractéristique du béton sur la contribution en cisaillement des plaques de renforcement - Cas de décollement de la plaque de renforcement

Modèle de calcul		La contribution des plaques de renforcement ( T ) KN			
		Décollement par fissuration			
		$f_c = 30\text{MPa}$	$f_c = 35\text{MPa}$	$f_c = 40\text{MPa}$	$f_c = 45\text{MPa}$
<b>Triantafillou</b>		116.81	123.54	130.28	134.78
<b>Modèle 01 BAEL</b>	<b>FRP</b>	101.00	106.99	112.46	117.51
	<b>FGM-k=5</b>	71.42	75.65	79.51	83.09
	<b>FGM-k=10</b>	60.35	63.92	67.19	70.21
<b>Modèle 02 Analogie de Morch</b>	<b>FRP</b>	101.05	107.03	112.50	117.56
	<b>FGM-k=5</b>	71.45	75.68	79.55	83.12
	<b>FGM-k=10</b>	60.37	63.94	67.21	70.24

L'influence de l'épaisseur de la plaque de renforcement sur la contribution des plaques composites en cisaillement d'une poutre en béton armé renforcée sur sa partie latérale dans le cas de rupture et de décollement de la plaque composite est montrée dans les tableaux IV.8 et IV.9, respectivement. L'épaisseur de la plaque de renforcement est prise égale:  $t=0.07, 0.09, 0.11$  et  $0.13$ mm. On peut voir d'après les résultats qu'au fur et à mesure que la plaque de renfort devient plus épaisse, la contribution de la plaque composite augmente.

L'effet de l'inclinaison de la plaque de renforcement sur la contribution des plaques composites en cisaillement dans le cas de rupture et de décollement de plaque sur une poutre en béton armé renforcée est montré dans les tableaux IV.10 et IV.11, respectivement. Plusieurs inclinaisons sont prises en considération à savoir:  $\theta=45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  et  $90^\circ$ . Il est à noter que lorsque la plaque de renfort est inclinée, la contribution de la plaque composite devient plus importante.

Le tableau IV.12 compare de la contribution en cisaillement des plaques de renforcement en CFRP et GFRP dans le cas de rupture et de décollement d'une poutre en béton renforcée. Les résultats obtenus montrent que la contribution en cisaillement d'une plaque composite en CFRP est supérieure à celle du GFRP.

**Tableau IV.6 :** Effet de l'espacement des renforts sur la contribution en cisaillement des plaques de renforcement - Cas de rupture de la plaque de renforcement

Modèle de calcul		La contribution des plaques de renforcement ( T ) KN			
		Rupture de la plaque de renforcement			
		S=40mm	S=50mm	S=60mm	S=70mm
Carolin, Täljsten et Sas		172.43	138.1	115.88	97.94
Chen et Teng		207.22	206.36	172.68	148.01
Modèle 01 BAEL	FRP	256.66	205.33	171.11	146.66
	FGM-k=5	147.86	118.29	98.58	84.49
	FGM-k=10	113.11	90.48	75.41	64.63
Modèle 02 Analogie de Morch	FRP	256.76	205.41	171.18	146.72
	FGM-k=5	147.92	118.34	98.61	84.52
	FGM-k=10	113.16	90.52	75.44	64.66

**Tableau IV.7** : Effet de l'espacement des renforts sur la contribution en cisaillement des plaques de renforcement - Cas de décollement de la plaque de renforcement

Modèle de calcul		La contribution des plaques de renforcement ( T ) KN			
		Décollement par fissuration			
		S=40mm	S=50mm	S=60mm	S=70mm
Carolyn, Täljsten et Sas		133.35	106.8	89.61	75.74
Chen et Teng		159.53	127.1	106.35	91.58
Modèle 01 BAEL	FRP	170.42	136.34	113.62	97.39
	FGM-k=5	120.50	96.40	80.33	68.86
	FGM-k=10	101.82	81.46	67.88	58.19
Modèle 02 Analogie de Morch	FRP	170.49	136.39	113.67	97.42
	FGM-k=5	120.54	96.43	80.37	68.88
	FGM-k=10	101.86	81.49	67.90	58.20

**Tableau IV.8** : Effet de l'épaisseur des renforts sur la contribution en cisaillement des plaques de renforcement - Cas de rupture de la plaque de renforcement

Modèle de calcul		La contribution des plaques de renforcement ( T ) KN			
		Rupture de la plaque de renforcement			
		t=0.07mm	t=0.09mm	t=0.11mm	t=0.13mm
Carolyn, Täljsten et Sas		107.29	138.1	168.60	199.26
Chen et Teng		161.17	206.36	253.27	299.32
Modèle 01 BAEL	FRP	114.07	205.33	250.96	296.59
	FGM-k=5	65.72	118.29	144.58	170.86
	FGM-k=10	50.27	90.49	110.60	130.70
Modèle 02 Analogie de Morch	FRP	114.12	205.41	251.06	296.70
	FGM-k=5	65.74	118.34	144.63	170.93
	FGM-k=10	50.29	90.52	110.64	130.75

**Tableau IV.9** : Effet de l'épaisseur des renforts sur la contribution en cisaillement des plaques de renforcement - Cas de décollement de la plaque de renforcement

Modèle de calcul		La contribution des plaques de renforcement ( T ) KN			
		Décollement par fissuration			
		t=0.07mm	t=0.09mm	t=0.11mm	t=0.13mm
Carolín, Täljsten et Sas		106.68	106.8	130.39	154.09
Chen et Teng		99.26	127.1	156	184.34
Modèle 01 BAEL	FRP	75.74	136.34	166.64	196.93
	FGM-k=5	53.56	96.40	117.82	139.24
	FGM-k=10	45.26	81.46	99.56	117.66
Modèle 02 Analogie de Morch	FRP	75.77	136.39	166.70	197.01
	FGM-k=5	53.58	96.44	117.87	139.30
	FGM-k=10	45.27	81.49	99.60	117.71

**Tableau IV.10** : Effet de l'inclinaison des renforts sur la contribution en cisaillement des plaques de renforcement - Cas de rupture de la plaque de renforcement

Modèle de calcul		La contribution des plaques de renforcement ( T ) KN			
		Rupture de la plaque de renforcement			
		$\theta = 45$	$\theta = 60$	$\theta = 75$	$\theta = 90$
Carolín, Täljsten et Sas		142.95	137.95	123.65	100.78
Chen et Teng		151.81	119.93	96.40	75.90
Modèle 01 BAEL	FRP	205.33	198.34	177.92	145.30
	FGM-k=5	118.29	114.26	102.50	83.71
	FGM-k=10	90.49	87.41	78.41	64.03
Modèle 02 Analogie de Morch	FRP	205.41	198.44	178.03	145.42
	FGM-k=5	118.37	114.32	102.56	83.78
	FGM-k=10	90.52	87.45	78.46	64.08

**Tableau IV.11** : Effet de l'inclinaison des renforts sur la contribution en cisaillement des plaques de renforcement - Cas de décollement de la plaque de renforcement

Modèle de calcul		La contribution des plaques de renforcement ( T ) KN			
		Décollement par fissuration			
		$\theta = 45$	$\theta = 60$	$\theta = 75$	$\theta = 90$
Carolyn, Täljsten et Sas		110.55	106.68	95.62	77.94
Modèle 01 BAEL	FRP	136.34	131.70	118.14	96.483
	FGM-k=5	96.40	93.12	83.53	68.22
	FGM-k=10	81.46	78.69	70.59	57.65
Modèle 02 Analogie de Morch	FRP	136.39	131.76	118.21	96.56
	FGM-k=5	96.44	93.17	70.63	68.27
	FGM-k=10	81.49	78.73	83.58	57.69

**Tableau IV.12**: Comparaison de la contribution en cisaillement d'une poutre renforcée par une plaque en CFRP et GFRP

Modèle de calcul		La contribution des plaques de renforcement (T) KN			
		Rupture de la plaque de renforcement		Décollement par fissuration	
		CFRP	GFRP	CFRP	GFRP
Carolyn, Täljsten et Sas		138.1	29.48	106.8	49.13
Chen et Teng		206.36	--	127.1	58.94
Triantafillou		213.5	72.29	164.3	67.47
Modèle 01-BAEL		205.33	69.71	136.34	69.14
Modèle 02-Analogie de Morch		205.41	69.73	136.39	69.16

Les figures IV.8 et IV.9 présentent l'effet de la variation du taux de distribution de porosité sur la contribution en cisaillement des plaques de renforcement FGM en  $Al/Al_2O_3$  et  $Al/ZrO_2$  d'une poutre en BA renforcée sur sa partie latérale, respectivement. L'évolution de la



contribution de la plaque FGM est représentée sur ces figures en fonction de l'écartement entre les plaques composites. Il est à noter que le changement du taux de distribution de porosité a une influence considérable sur la contribution de la plaque FGM.

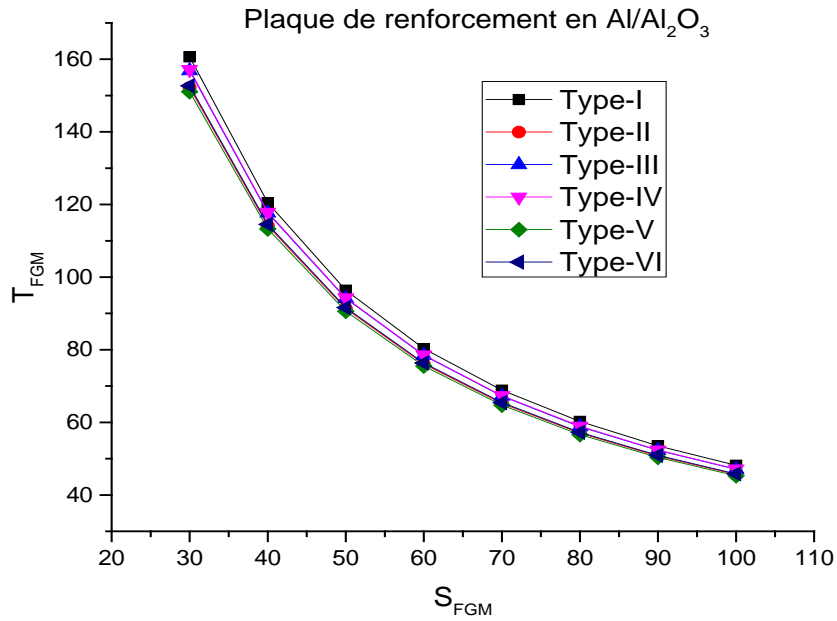
L'effet de la variation du taux de distribution de porosité en fonction la hauteur des plaques de renforcement sur la contribution en cisaillement des plaques FGM poreuses en Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Al/ZrO<sub>2</sub> est montré dans les figures IV.10 et IV.11, respectivement. On peut voir sur ces figures que la contribution des plaques FGM au cisaillement augmente avec la hauteur de la plaque de renforcement.

Les figures IV.12 et IV.13 montrent la variation de la contribution des plaque FGM en Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Al/ZrO<sub>2</sub> en cisaillement en fonction de l'inclinaison des plaques FGM, respectivement. Six différents types de distribution de porosité sont pris en considération dans ces graphes. Il est clair que la contribution des plaques FGM poreuse devient plus importante quand la forme de distribution de porosité est de type: I pour une plaque FGM en Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et du type IV pour une plaque FGM en Al/ZrO<sub>2</sub>.

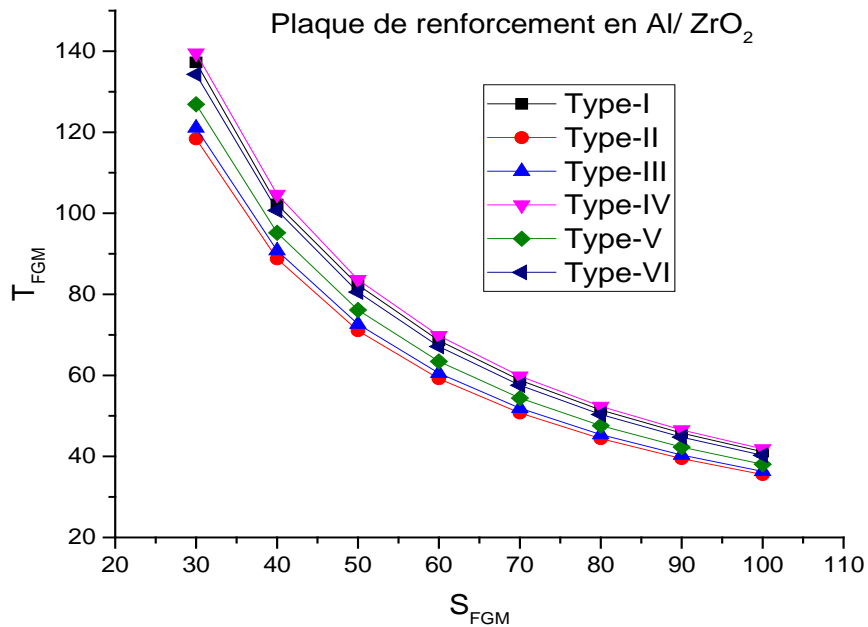
L'effet de la variation du taux de distribution de porosité sur la contribution en cisaillement des plaques de renforcement en fonction de la largeur des plaques FGM en Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Al/ZrO<sub>2</sub> est illustré dans les figures IV.14 et IV.15, respectivement. La fraction volumique de porosité est pris égale à  $\alpha=0.2$ . On peut dire que la largeur des plaques de renforcement a un effet important sur la contribution des plaques de renforcement en cisaillement d'une poutre en béton renforcée sur sa partie latérale.

L'effet de la fraction volumique de porosité sur la contribution des plaques FGM poreuses en Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Al/ZrO<sub>2</sub> est également montré dans les figures IV.16 et IV.17, respectivement. La contribution des plaques FGM poreuses est présentée pour différents types de distribution de porosité. L'indice de puissance est pris égal à  $k=5$ . Les graphes obtenus ont montré que l'effet de la variation du taux de distribution de porosité devient plus clair avec l'augmentation de la fraction volumique de porosité.

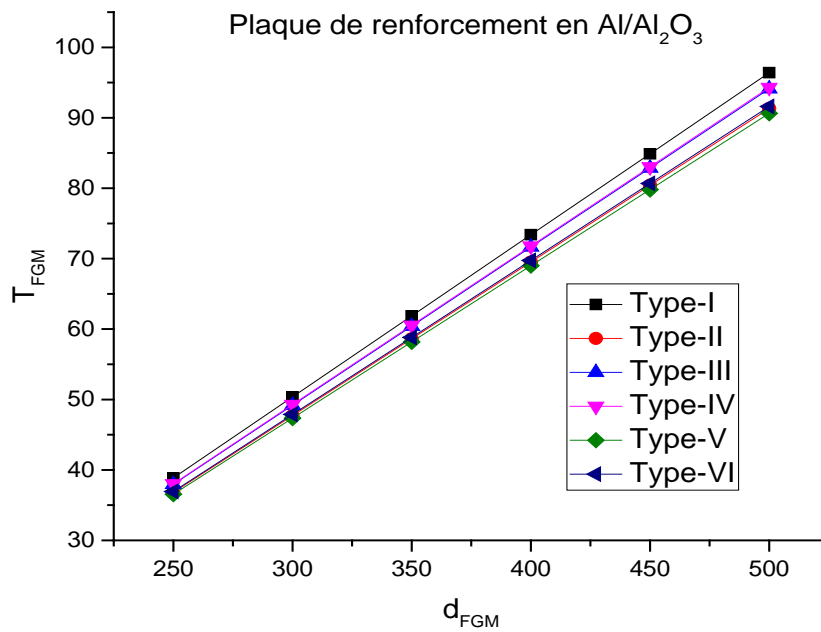
Les figures IV.18 et IV.19 montrent l'influence de l'indice de puissance sur la contribution en cisaillement des plaques FGM poreuses en Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Al/ZrO<sub>2</sub> d'une poutre en béton armé, respectivement. L'inclinaison des plaques FGM est prise égale  $\theta=45^\circ$ . On peut constater que la contribution en cisaillement des plaques FGM devient plus faible à mesure que la plaque de renforcement devient plus riche en métal.



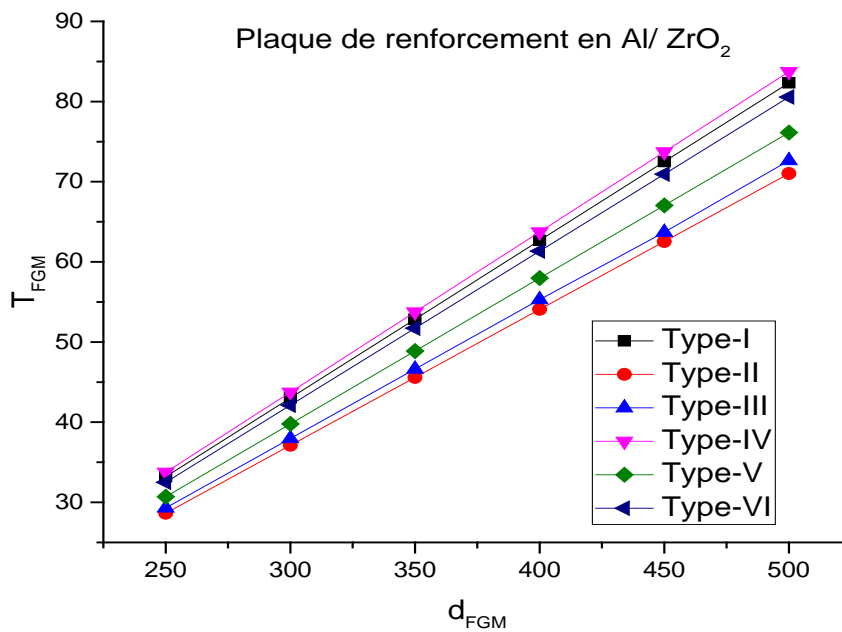
**Figure IV.8 :** Effet de l'espace des plaques sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par des plaques composite en FGM - Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



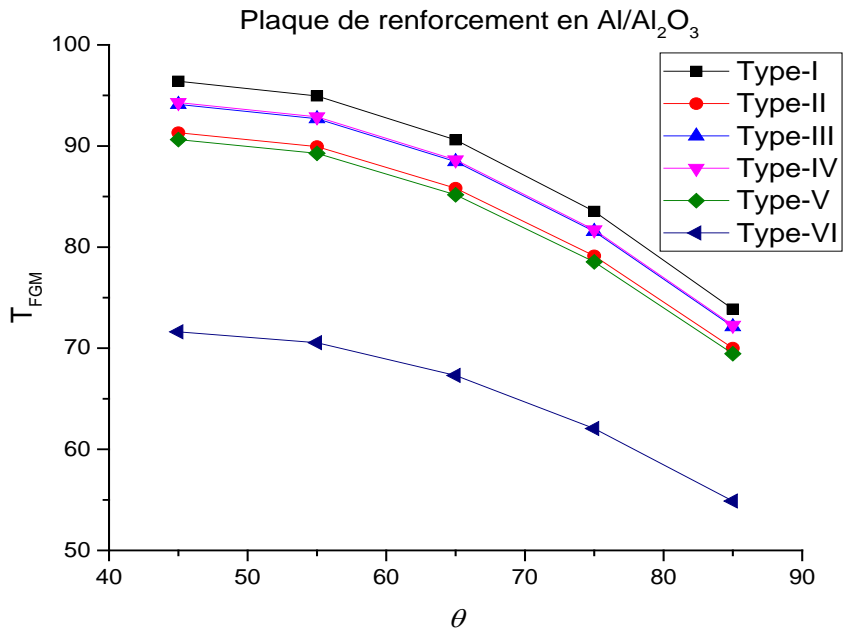
**Figure IV.9 :** Effet de l'espace des plaques sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par des plaques composite en FGM - Al/ZrO<sub>2</sub>



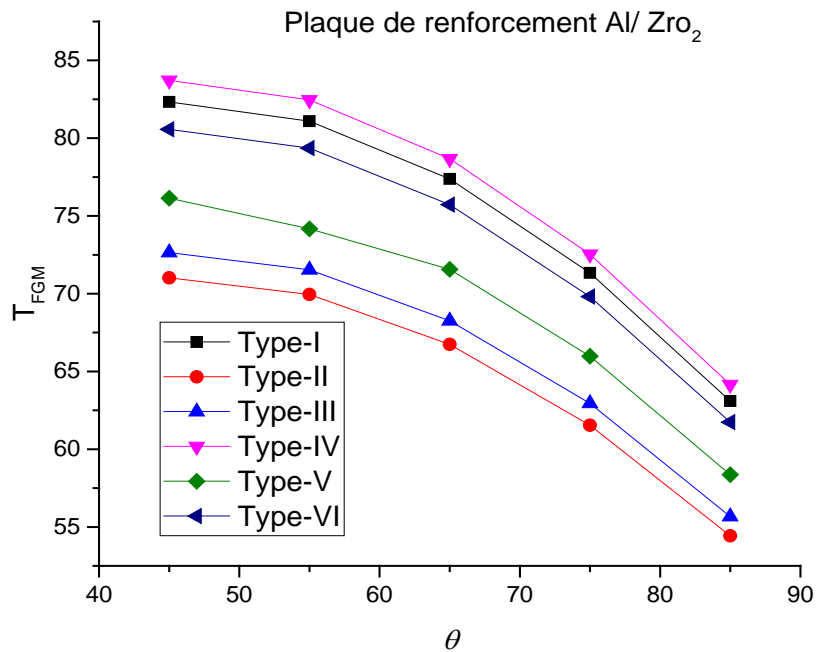
**Figure IV.10 :** Effet de la hauteur des bandes sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM en Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



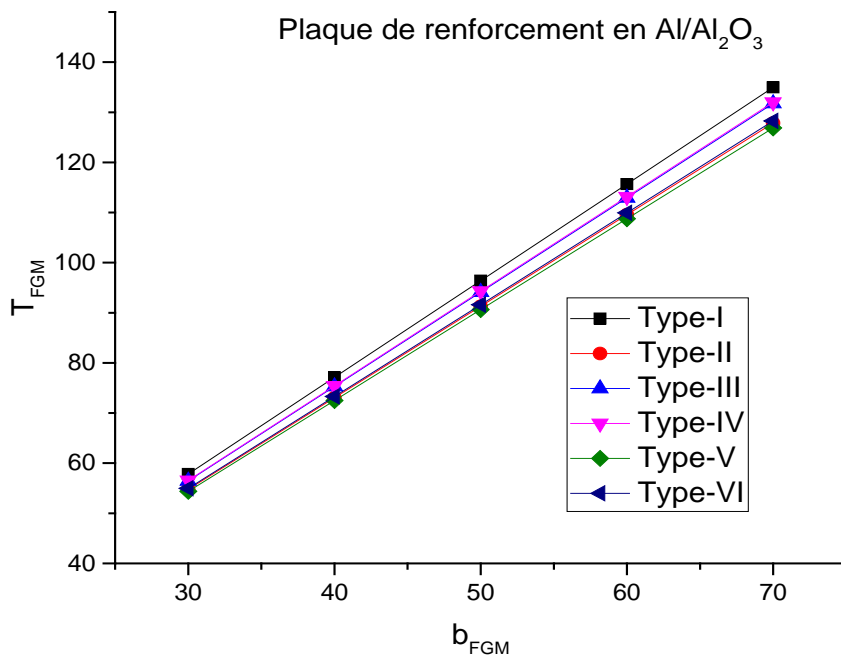
**Figure IV.11 :** Effet de la hauteur des bandes sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM en Al/ZrO<sub>2</sub>



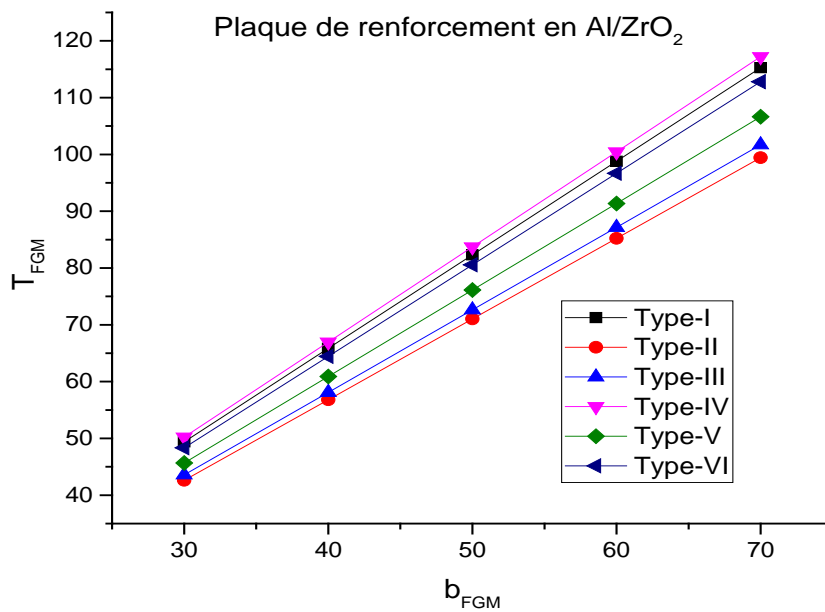
**Figure IV.12 :** Effet de l'angle téta d'inclinaison des plaques de renforcement sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM en Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



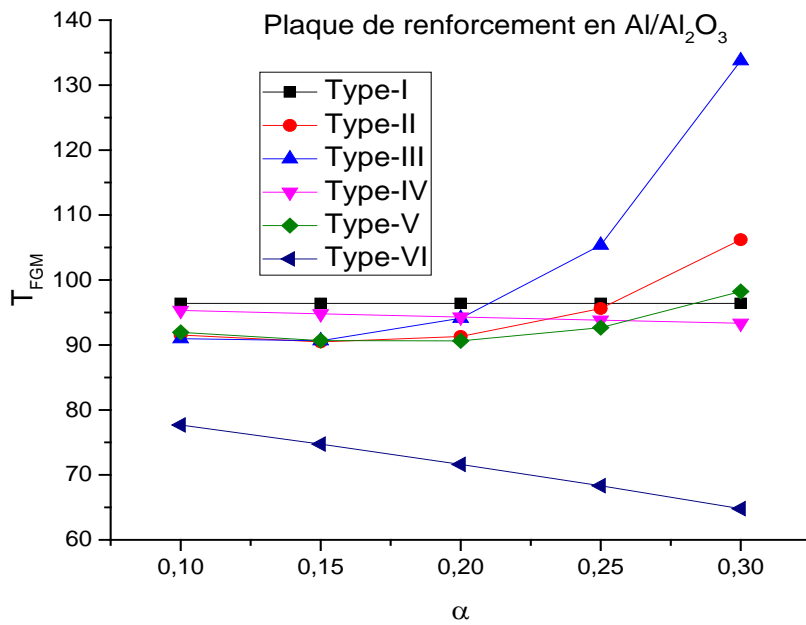
**Figure IV.13 :** Effet de l'angle téta d'inclinaison des plaques de renforcement sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM Al/ZrO<sub>2</sub>



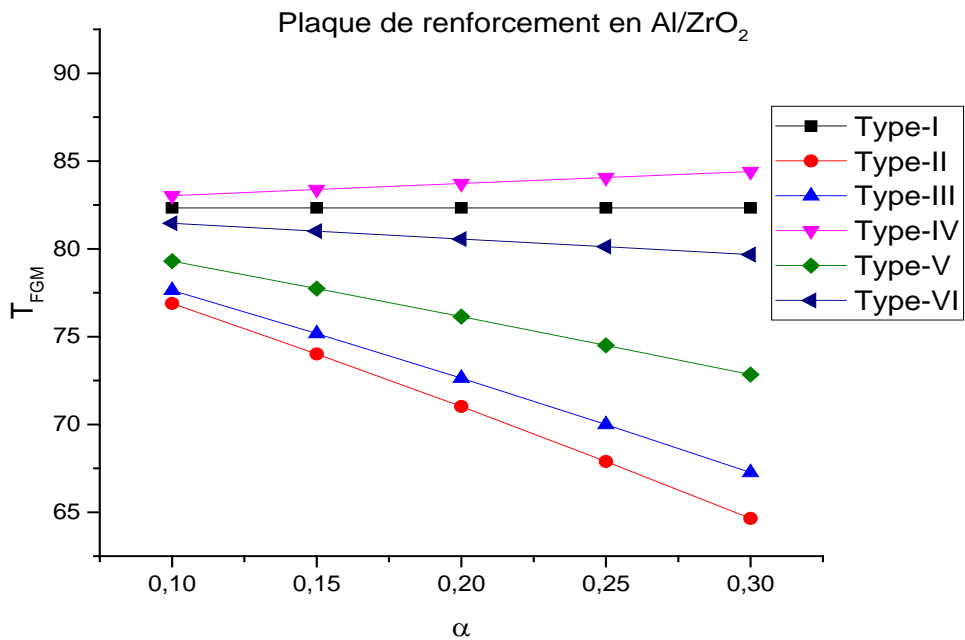
**Figure IV.14 :** Effet de la largeur des plaques sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



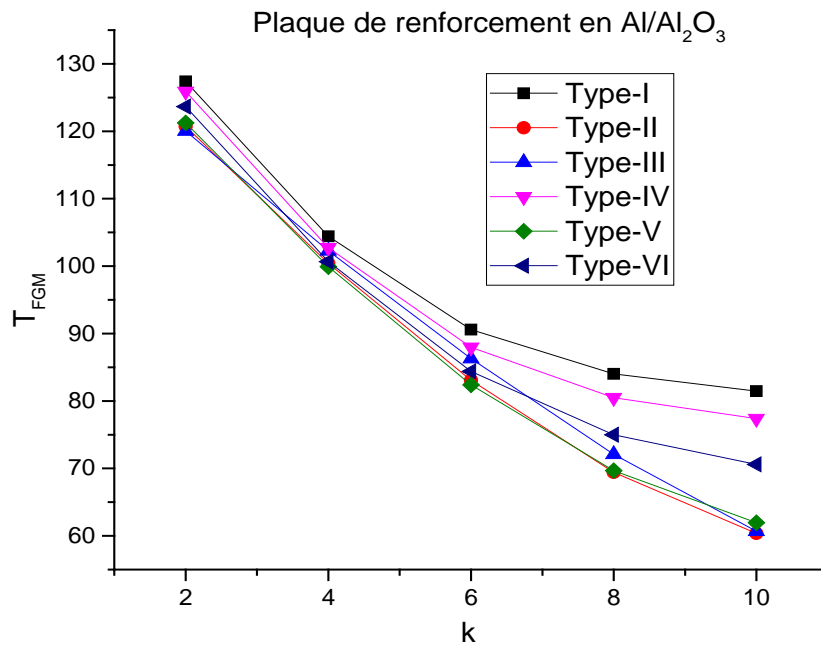
**Figure IV.15 :** Effet de la largeur des plaques sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM Al/ZrO<sub>2</sub>



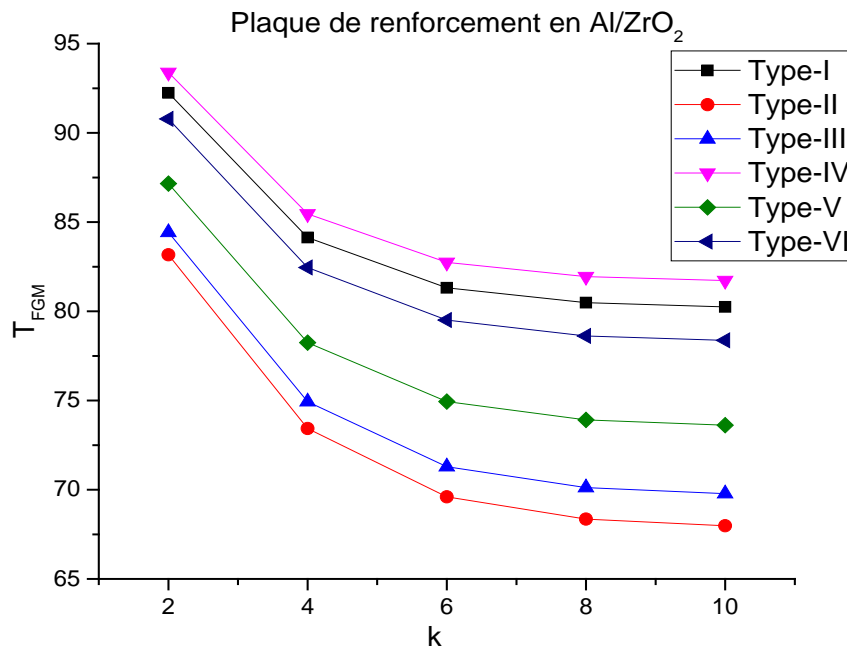
**Figure IV.16 :** Effet des porosités sur la contribution du renfort d’une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



**Figure IV.17 :** Effet des porosités sur la contribution du renfort d’une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM Al/ZrO<sub>2</sub>



**Figure IV.18 :** Effet de l'indice de puissance sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



**Figure IV.19 :** Effet de l'indice de puissance sur la contribution du renfort d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par une bande en composite FGM Al/ZrO<sub>2</sub>

#### **IV.5. Conclusion :**

Dans le cadre de ce travail nous avons présenté deux modèles analytiques basés sur le code BAEL et l'analogie de Morch pour déterminer la contribution en cisaillement des plaques composites classiques (FRP) et avancées (FGM) dans une poutre en béton armé. L'effet de la variation du taux de distribution de porosité a été considéré dans cette étude en utilisant des lois des mélanges modifiées. Les effets de différents paramètres qui peuvent influencer la contribution en cisaillement des plaques composites sont également discutés. Cette étude analytique a montré que la réparation par matériaux FGM améliore les performances mécaniques des poutres en béton armé en termes de la résistance en cisaillement. Cette résistance devient plus faible avec l'augmentation de l'indice de puissance.



# Conclusions générales

## **Conclusions générales:**

L'utilisation des matériaux composites classiques et avancés dans la réparation et la réhabilitation des structures vulnérables offre aux concepteurs des solutions pour le renforcement des différents éléments des structures.

Les matériaux composites classiques et avancés se caractérisent par leur souplesse et leur simplicité de mise en œuvre. Leur choix comme éléments additifs de renforcement s'impose pour les structures endommagées, et constitue une solution alternative aux autres techniques de renforcement telle que le chemisage, la précontrainte additionnelle ou le béton projeté.

Les études récentes faites sur les structures renforcées par matériaux composites classiques et avancés ont montré que ces derniers augmentent la rigidité des éléments supports réduisent la déformation et redonne aux éléments détériorés leur portance initiale. Cependant, dans la plupart des cas, une dispersion entre les résultats expérimentaux et les modèles numériques est observée.

L'étude analytique avait pour objectif de déterminer la contribution en cisaillement des plaques de renforcement pour une poutre en béton armé renforcée par des plaques composites de haute performance. Deux modèles analytiques basés sur le code BAEL et l'analogie de Morch ont été présentés. L'effet de porosité qui peut se produire dans les matériaux composites au cours de leur fabrication est également étudié.

Les résultats de cette étude menée aux conclusions suivantes:

- L'effet de la variation du taux de distribution de porosité devient plus clair avec l'augmentation de la fraction volumique de porosité.
- La contribution en cisaillement des plaques FGM devient plus faible à mesure que la plaque de renforcement devient plus riche en métal.
- Le changement du taux de distribution de porosité a une influence considérable sur la contribution de la plaque FGM.
- La contribution en cisaillement de la plaque de renforcement devient plus importante lorsque la plaque composite est inclinée.

Références  
bibliographiques

**Références bibliographiques:**

- Abou Chakra, F. (2016). "Renforcement des poteaux en béton armé au moyen de polymère renforcé par fibre de carbone: comparaison des codes."
- Achour, T. (2011). "Étude des techniques de réparation des structures composites endommagées."
- Ait Taleb, S. (2016). Analyse du comportement des poutres non-homogènes renforcées par des plaques composites, Université Mouloud Mammeri.
- Akongu, N. and S. Tchoumi (2007). "Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures." Université de Douala.
- Bouchard, J.-B. (2016). Étude sur la durabilité des bétons armés en milieu marin: application aux caissons du projet d'extension en mer au droit de l'Anse du Portier, Monaco, Gouvernement Princier de Monaco, Mission Urbanisation en Mer, Centre ....
- Boukhezar, M. (2009). "Réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composites."
- Boumadine;I et Ouali, K. (2020). Contribution à l'étude de comportement d'un bâtiment en béton armé, Renforcé par les matériaux composites, Saad Dahleb.
- Calgaro, J.-A. and R. La croix (1999). "Projet de renforcement ou de réparation d'un pont." Techniques de l'ingénieur. Génie civil(C4503): C4503. 4501-C4503. 4520.
- Courard, L. (2015). "Maladies des bétons: entre fatalité et prise en charge."
- Godart, B. and A. Le Roux (2008). "Alcali-réaction dans les structures en béton: Mécanisme, pathologie et prévention." Techniques de l'Ingénieur: 19p.
- GGuelmine, A. pathologies structures, Université Mohamed el bachir el ibrahim el ibrahim - Bordj Bou Areridj
- Kerboua, N. (2007). Contribution à la mesure de la corrosion des aciers dans le béton armé, Alger.
- Kretz, T., B. Godart and L. Divet (2007). "Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne." Guide technique des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Merdas, A.-e. (2005). "Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA." université de Constantine, thèse de magister.

Moulai, A. B., Amel, B (2007). Diagnostic des dégradation des ouvrages en béton armé et méthodologie d'intervention, Sciences et de technologie d'oran.

Ouzaa, K. (2015). "Réhabilitation des structures."

Perchat, J. (1993). "Béton armé: Règles BAEL: 4. Pièces soumises à des sollicitations normales." Techniques de l'ingénieur. Construction3(C2306): C2306. 2301-C2306. 2340.

Perchat, J. B. e. (1986). "Béton armé règles BAEL, pièces soumises a des sollicitation normales " Techniques de l'ingénieur.

Sas, G. (2008). FRP shear strengthening of RC beams and walls, Luleå tekniska university.

Scott, B. D. and M. Safiuddin (2015). "Abrasion resistance of concrete–Design, construction and case study." Concrete Research Letters6(3): 136-148.

Taillon, G. (2016). Caractérisation de la résistance à l'érosion par cavitation d'aciers et de revêtements HVOF pour la protection de turbines hydrauliques, École Polytechnique de Montréal.

Véronique, V. (2011). " Détermination l'endommagement du béton par méthode pétrographique quantitative " Laval Québec: 203p.

Wu, Z. Y. (2004). Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton armé pré-fissurées et renforcées par matériaux composites sous chargement statique et de fatigue, Ecole des Ponts Paris Tech.

Ziou, H. (2017). Contribution à la modélisation des structures en Matériaux à Gradient Fonctionnel, Université Mohamed Khider-Biskra.

Zohra, B. (2019). Pathologies et réhabilitation des ponts, Université Hassiba Benbouali de Chlef