



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

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

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

CHAIB Nour El Houda

BOUSSOUAR Hadjar

Sujet du mémoire

***Résistance des colonnes en béton armé confinées renforcés
par différents types de composites***

Soutenu publiquement ledevant le jury composé de :

Mr,	Président
Mr,	Rapporteur
Mr,	Examineur
Mr,	Examineur
Mr,	Examineur

2019/2020

Remerciements


Nous remercions tout d'abord Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

Nos vifs remerciements s'adressent, naturellement, à notre Professeur RABAHI Abderezak., pour avoir proposé et dirigé ce travail, pour ses orientations, ses précieux conseils ainsi que ses idées limpides qui nous ont été d'une grande utilité. Qu'il trouve ici l'expression de toute nos gratitudes, également, pour avoir été toujours à l'écoute et répondu présent à chaque fois que nous le sollicitais, malgré le fait de rester à la maison à cause de La pandémie de Corona, ainsi que pour la confiance qu'il a sue nous accorder pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à remercier vivement les membres du jury pour avoir accepté de composer ce jury et d'avoir consacré de leur temps pour expertiser notre travail.

Enfin, nous souhaitons également remercier nos amis et tous les gens que nous entoure, pour toute l'énergie positive qu'ils dégagent et qui influence directement leur entourage, pour leur soutien ainsi que pour les bons moments que nous avons partagés.

Dédicaces



*A ceux qui ont fait de moi
ce que je suis et qui sont toujours
présents pour me soutenir tout
moment.*

A mes parents

*A ma sœur FATIMA ZOHRA, mon frère et sa petite famille et
ma cher FATMA en témoignage de leur amour et de leurs
encouragements continus*

A tous les membres de ma famille CHAIB et ABDELHADI.

A tous ceux qui m'aiment.

CHAIB Nour El Houda

Je dédie le présent travail

A mes chers parents ;

A la mémoire de mon défunt frère Sadek ;

*A mon fiancé RIDA et tous les membres de ma
chère famille ;*

A tous les gens qui m'aimé

BOUSOIRE Hadjer

Sommaire

Résumé.....	IX
Abstract.....	X
ملخص.....	XI
Introduction générale.....	XII
Chapitre I : Pathologies et techniques de réparation des ouvrages en béton armé	
I.1- Introduction.....	1
I.2. Pathologies des ouvrages en béton armé.....	1
I.2.1. Dégradation des matériaux.....	2
I.2.2. Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution.....	5
I.2.3. Modification des conditions d'exploitation des ouvrages.....	6
I.3. Techniques de réparation et renforcement des ouvrages en béton armé.....	7
I.3.1. Méthodes de réparation non structurales.....	7
I.3.2. Méthodes de réparation structurales.....	8
I.3.2.1. Réparation par béton projeté.....	8
I.3.2.2. Réparation par Le chemisage.....	9
I.3.2.3. Réparation par adjonction d'armature complémentaire.....	11
I.3.2.4. Réparation par précontrainte additionnelle.....	12
I.3.2.5. Renforcement par collage de plats métalliques.....	13
I.3.2.6 : Réparation et renforcement par collage des matériaux composites.....	16
I.4. Conclusion.....	20
Chapitre II : Généralité sur les matériaux composites	
II.1. Introduction.....	16
II.2. Définition de composite.....	16
II.3- Avantages et inconvénients des matériaux composites.....	18
II.4. Les éléments constituant le matériau composite a base des fibres (les fibres, les résines).....	19

<i>II.4.1. LES RENFORTS</i>	20
<i>II.4.2. Les matrices</i>	25
<i>III.4.2.1. Résines thermodurcissables</i>	26
<i>II.4.2.2. Résines thermoplastiques</i>	27
<i>II.3.2.3. Comparaison entre ces deux types de résines</i>	28
<i>II.5. L'utilisation des composites dans le domaine de génie civil</i>	28
<i>II.5.1. Composites dans les bâtiments</i>	30
<i>II.5.1.1. Mécanique</i>	30
<i>II.5.1.2-Amélioration de la sécurité</i>	30
<i>II.5.1.3.Amélioration de certaines propriétés physique</i>	30
<i>II.6. Conclusion</i>	31
 Chapitre III : Comportement des poteaux en béton armé confinés par composite	
<i>III.1. Introduction</i>	31
<i>III.2. Méthodes de confinement</i>	31
<i>III.2.1. Stratification au contact</i>	31
<i>III.2.2.Enroulement filamentaire</i>	34
<i>III.2.3. Chemisage par coquille préfabriquée en « FRP »</i>	35
<i>III.2.4. Comparaison des méthodes de renforcement</i>	36
<i>III.3. Le comportement mécanique des poteaux confinés</i>	37
<i>III.4. Contrainte - déformation du béton confiné avec matériaux composites</i>	40
<i>III.4.1.Modèle de [(Fardis,Khalili).1982]</i>	40
<i>III.4.2. Modèle de [(Saadatmanesh et al).1994]</i>	40
<i>III.4.3.Modèle de [(Miyauchi et al).1999]</i>	41
<i>III.4.4. Modèle de [Lam et Teng).2003]</i>	41
<i>III.5. Conclusion</i>	44

Chapitre IV : Mécanisme de confinement en FRP des sections circulaires

<i>IV.1. Introduction</i>	46
<i>IV.2. Notions sur le confinement des sections circulaires par FRP</i>	46
<i>IV.2.1. Notations des paramètres utilisés dans la section</i>	48
<i>IV.2.2. Pression de confinement ultime</i>	48
<i>IV.2.3. Rigidité de confinement</i>	49
<i>IV.2.4. Modèle proposé pour le travail</i>	49
<i>IV.3. Développement d'une nouvelle loi de comportement</i>	50
<i>IV.3.1. Forme générale de la nouvelle courbe</i>	50
<i>IV.3.2. Hypothèses de développement</i>	50
<i>IV.3.3. Expression de la nouvelle loi contrainte-déformation</i>	50
<i>IV.4. Présentation du modèle proposé</i>	52
<i>IV.5. Résultats et discussions</i>	53
<i>IV.5.1. Effet de la rigidité de la plaque de renforcement</i>	53
<i>IV.5.2. Effet de l'épaisseur de la plaque t_f</i> :	55
<i>IV.5.3. Effet de diamètre de spécimen D : en gardant $H = 305$ mm.</i>	56
<i>IV.6. Conclusion</i>	57
<i>Conclusion générale</i>	63
<i>Référence bibliographique</i>	

Liste des tableaux

Tableau I.1: Avantages et inconvénients du béton chemisage en béton armé 10

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients du tôle d'acier colle..... 16

Tableau II.1 : les différents types de composites..... 17

Tableau II.2: Propriétés des fibres de verre type E et S..... 21

Tableau II.3: Résumé quelques propriétés des fibres de carbone (HR et HM) 23

Tableau II.4: Propriétés des fibres d'Aramides.. 24

Tableau II.5: Caractéristiques des résines thermodurcissables 27

Tableau II.6: Caractéristiques des résines thermoplastiques 27

Tableau II.7: Comparaison entre les deux types de résines..... 28

Tableau III.1: Avantages et inconvénients de Stratification au contact.. 34

Tableau III.2: Avantages et inconvénients d'Enroulement filamentaire. 35

Tableau III.3: Avantages et Inconvénients de Chemisage par coquille préfabriquée en « FRP »..... 36

Tableau III.4: Comparaison entre les méthodes de mise en œuvre 36

Tableau IV.1: Propriétés géométriques et mécaniques des matériaux. 52

Tableau IV.2. Effet de la rigidité de composite sur le poteau confiné. 54

Tableau IV.3. Effet de l'épaisseur de la plaque t_f sur le poteau confiné..... 56

Tableau IV.4. Effet de diamètre de spécimen D sur le poteau confiné..... 56

Liste des figures

Figure I.1 : Erosion du béton	3
Figure I.2 : gel-dégel du béton	3
Figure I.3: Altération physico-chimique du béton	4
Figure I.4 : Carbonatation des bétons.....	4
Figure I.5 : Retrait du béton.....	5
Figure I.6 : Fissuration d'un poteau et une poutre en béton armé en milieu salin.....	5
Figure I.7: Fissuration de poutres et de poteaux d'une structure âgée atteinte d'alcali réaction.....	6
Figure I.8: Réparation de poutre par béton projeté.....	9
Figure I.9: renforcement au moyen de béton projeté en général	9
Figure I.10: Chemisage d'un poteau.....	10
Figure I.11: Différents étapes de renforcement des poteaux au moyen d'une enveloppe en béton armé (chemisage).....	11
Figure I.12: Réparation de poutre par adjonction d'armature.....	12
Figure I.13: Différents types de réparation par précontrainte additionnelle.	12
Figure I.14: Détail d'un renforcement d'un poteau carré par précontraintes additionnelle	13
Figure I.15: Renforcement d'un viaduc par tôles collées	15
Figure I.16: Différents étapes renforcement d'un poteau par gainage métallique	15
Figure I.17: Différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques en composites	17
Figure I.18: Poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites.....	17
Figure I.19: confinements d'un poteau au moyen de CFRP.	18
Figure I.20: Mise en œuvre d'une réparation par stratification.	19
Figure I.21: Mise en œuvre d'une réparation par matériaux composites.....	20
Figure II.1: matériaux composites [Jean-Marie Berthelot].....	17

<i>Figure II.2: matériaux composites : a) composites renforcés avec particules.</i>	18
<i>Figure II.3: Définition types de composites</i>	19
<i>Figure II.4: Principaux matériaux de renforts</i>	20
<i>Figure II.5 : Tissue de fibres de verre.</i>	22
<i>Figure II.6: Organisation hexagonale du tissu des atomes de Carbone.</i>	22
<i>Figure II.7: Fibres de carbone.</i>	23
<i>Figure II.8: Fibres d'aramide.</i>	24
<i>Figure II.9: Histogramme des résistances à la rupture en traction des fibres.</i>	25
<i>Figure II.10: Organigramme des différentes familles de matrice.</i>	26
<i>Figure II.11: Comparaison entre les deux types de résines.</i>	28
<i>Figure II.12 : Applications des composites en génie civil</i>	29
<i>Figure III.1: confinement des poteaux par stratification directe</i>	32
<i>Figure III.2: Poteau confiné a) Confinement discontinu</i>	33
<i>Figure III.3: Etapes de mise en œuvre du renfort textile à fibres continues</i>	33
<i>Figure III.4: Confinement des poteaux par enroulement filamentaire.</i>	34
<i>Figure III.5: Chemisage par coque en FRP</i>	35
<i>Figure III.6: Action du confinement d'un composite FRP</i>	37
<i>Figure III.7: Courbes contrainte-déformation</i>	39
<i>Figure III.8: Modèle σ-ϵ de Lam et Teng pour le béton confiné par FRP</i>	43
<i>Figure IV.1: Réponse contrainte-déformation bilinéaire des colonnes circulaires.</i>	47
<i>Figure IV.2: Mécanisme de confinement du béton confiné au FRP.</i>	49
<i>Figure IV.3: Courbe contrainte-déformation pour le comportement du béton confiné en FRP</i>	51
<i>Figure IV. 4: Validation du modèle proposé en comparant avec le modèle</i>	53
<i>Figure IV. 5: Effet de la rigidité de composite sur le poteau confiné.</i>	54
<i>Figure IV.6: Effet de l'épaisseur de la plaque t_f.</i>	55
<i>Figure IV.7: Effet de diamètre de spécimen D.</i>	57

Liste des notations

FRP : Fiber Reinforced Polymers « polymères renforcés de fibres ».

AFRP : Aramid Fiber Reinforced Polymer « polymères renforcés de fibres d'aramide ».

GFRP : Glass Fiber Reinforced Polymer « polymères renforcés de fibres de verre ».

CFRP : Carbon Fiber Reinforced Polymer « polymères renforcés de fibres de carbone ».

f_l : La pression de confinement latérale due au FRP.

f_0 : La pression plastique de transition.

f_t : résistance à la traction maximale de FRP.

t_f : épaisseur totale de l'enveloppe en FRP.

E_f : module d'élasticité en traction du FRP.

D : le diamètre du noyau de béton.

d : Diamètre de la section du béton.

k_1 : Coefficient d'efficacité de confinement.

f_l : Pression de confinement latérale due au composite « FRP ».

f_t : La contrainte axiale de transition du béton confiné dans la courbe contrainte-déformation.

f_{cc} : L'axe de contrainte.

f_{c0} : Résistance du béton non confiné.

f_{prf} : La résistance à la traction du composite FRP.

f'_{cc} : Résistance à la compression axiale maximale du béton confiné par composite « FRP ».

f'_{co} : Résistance à la compression axiale maximale du béton non confiné.

f'_{cu} : Résistance à la compression axiale ultime du béton confiné par composite « FRP ».

E_{co} : Module d'élasticité du béton non confiné.

E_c : Module d'élasticité de l'acier d'armatures.

E_2 : La deuxième pente de la courbe contrainte-déformation bilinéaire ascendante.

E_{prf} : Le module d'élasticité en traction du composite FRP.

E_{sec} : Sécant module de béton confiné à la contrainte maximale.

t_{prf} : L'épaisseur totale du FRP.

ρ_{prf} : Le rapport volumétrique du FRP.

σ_c : La contrainte axiale du béton confiné.

ε_{prf} : La déformation ultime de traction du composite FRP.

ε_{hrp} : La déformation de rupture du composite en AFRP.

ε_{cc} : Déformation axiale maximale du béton confiné par composite « FRP ».

ε_{co} : Déformation axiale maximale du béton non confiné.

ε_{cu} : Déformation axiale ultime du béton confiné par composite « FRP ».

ε_t : Déformation axiale de transition du béton confiné dans la courbe contrainte-déformation.

ε_c : Contrainte de compression longitudinale du béton.

Résumé

Durant ces dernières années, la réhabilitation a fait l'objet d'une recherche extensive en raison de l'augmentation des dépenses de travaux de renforcement et de réparation des ouvrages bâtis. Dans tous les cas, il est impérativement indispensable de procéder à des méthodes de renforcement ou de réparation des éléments structuraux, et cela suite à une inspection d'analyses et de méthodologie d'un bon diagnostic. Les poteaux en béton armé sont des éléments importants dans les structures des bâtiments. Cette recherche traite le comportement des poteaux en béton armé, confinés par FRP. Elle permet de comparer entre l'apport du procédé utilisé de point de vue capacité en résistance et en déformation des sections des éléments réhabilités par rapport aux sections initiales. Les différents résultats obtenus ont permis de constater un gain considérable de la capacité en résistance et en déformation des sections renforcées sans augmentation considérable du poids des éléments réhabilités.

Ce travail concerne l'étude du comportement axial résultant de l'effet du confinement externe procuré par une enveloppe en matériaux composites à base de différentes fibres (AFRP, CFRP, GFRP, Bore). Pour l'ensemble des spécimens testés, une étude paramétrique sera faite pour voir leur influence sur le comportement des poteaux confinés.

Mots clés : Poteau en béton, Confinement par FRP, Renforcement et réparation, Matériaux composite, Résistance, Plaque renforcé en 'FRP', Réhabilitation.

Abstract

In recent years, rehabilitation has been the subject of extensive research due to the increase in expenditure on reinforcement and repair work on built structures. In all cases, it is imperative to carry out methods of strengthening or repairing the structural elements, and this following an inspection of analyzes and methodology of a good diagnosis. Reinforced concrete columns are important elements in the structures of buildings. This research deals with the behavior of reinforced concrete poles, confined by FRP. It makes it possible to compare between the contribution of the process used from the point of view of resistance and deformation capacity of the sections of the rehabilitated elements compared to the initial sections. The various results obtained made it possible to note a considerable gain in the capacity in resistance and in deformation of the reinforced sections without considerable increase in the weight of the rehabilitated elements.

This work concerns the study of the axial behavior resulting from the effect of external confinement provided by an envelope made of composite materials based on different fibers (AFRP, CFRP, GFRP and Boron). For all the specimens tested, for all the specimens tested, a parametric study will be made to see their influence on the behavior of the confined posts.

Keywords: Concrete pole, Containment by FRP, Reinforcement and repair, Composite materials, Resistance, Reinforced plate in 'FRP', Rehabilitation.

ملخص

في السنوات الأخيرة، كانت إعادة التأهيل موضوع بحث مكثف بسبب زيادة الإنفاق على أعمال التعزيز والإصلاح على الهياكل المبنية. في جميع الحالات، من الضروري تنفيذ طرق لتقوية أو إصلاح العناصر الهيكلية، وذلك بعد فحص التحليلات ومنهجية التشخيص الجيد. تعتبر الأعمدة الخرسانية المسلحة عناصر مهمة في هياكل المباني. يتناول هذا البحث سلوك أعمدة الخرسانة المسلحة، المحصورة بواسطة FRP. يجعل من الممكن المقارنة بين مساهمة العملية المستخدمة من وجهة نظر المقاومة وقدرة التشوه لأقسام العناصر التي تم إعادة تأهيلها مقارنة بالأقسام الأولية. جعلت النتائج المختلفة التي تم الحصول عليها من الممكن ملاحظة زيادة كبيرة في القدرة على المقاومة وتشوه الأقسام المقواة دون زيادة كبيرة في وزن العناصر التي تم إصلاحها.

يتعلق هذا العمل بدراسة السلوك المحوري الناتج عن تأثير الحبس الخارجي الذي يوفره ظرف مصنوع من مواد مركبة تعتمد على ألياف مختلفة (AFRP ، CFRP ، GFRP، البورون). لجميع العينات التي تم اختبارها ، سيتم إجراء دراسة بارامترية لمعرفة تأثيرها على سلوك الوظائف المحصورة.

الكلمات المفتاحية: عمود خرساني، الاحتواء بواسطة FRP ، التعزيز والإصلاح، المواد المركبة، المقاومة، لوح مقوى في "FRP" ، إعادة التأهيل.

Introduction générale

Actuellement, de nombreuses constructions anciennes sont subissent des désordres qui mettent en danger la sécurité de leurs usagers.

L'un des problèmes majeurs dans le domaine de la construction est la dégradation des structures. La plupart des structures présentent des signes de faiblesse et ne répondent plus aux exigences pour lesquelles elles ont été conçues. Les causes sont multiples, on peut citer : des erreurs lors de l'étude ou de l'exécution, un accroissement des charges, un changement de l'exploitation de la structure, la corrosion des armatures, des actions accidentelles telles que les séismes ou les chocs...

L'apparition de ces problèmes ne laisse que deux solutions : la reconstruction ou la réparation.

Dans la plupart des cas les frais de la reconstruction sont beaucoup plus importants que la réparation et le renforcement, ce qui fait que celles-ci seront plus appropriées. La réparation visant à retrouver les performances initiales d'une structure endommagée, alors que le renforcement consiste en l'amélioration des performances d'une structure, endommagée ou non, pour répondre à de nouveaux besoins ou pour répondre à un besoin de remise en conformité.

L'étude du comportement pathologique des ouvrages en béton met en évidence les dommages subis par ceux-ci, qui sont généralement dus à des erreurs de dimensionnement, au vieillissement des matériaux ou simplement à des modifications des conditions d'exploitation de ces ouvrages.

De nombreuses techniques ont été développées pour le renforcement des structures en béton armé comme le chemisage des poteaux, l'incorporation de profilés métalliques, l'augmentation de la section du béton avec ou sans augmentation des armatures.

Les méthodes classiques de renforcement et de réparation des colonnes se résument essentiellement à la pose de chemises en acier ou l'augmentation de la section qui nécessite le rajout de nouvelles armatures et le coulage d'un nouveau béton autour de l'ancienne colonne. Néanmoins, ces méthodes traditionnelles se trouvent confrontées à plusieurs problèmes comme la corrosion de l'acier et la difficulté de mise en œuvre ou le recours à de lourds équipements de chantier.

Récemment, les ingénieurs en génie civil prient de conscience du potentiel des matériaux composites dans le renforcement et la réparation des ouvrages en béton. En raison, de par leurs performances mécaniques remarquables, surtout en traction, leur légèreté et leur adhérence au béton. Ces matières offrent une alternative préférable.

Depuis les années 90, ces matières offrent une alternative préférable. Elle a été développée et devenu un procédé innovant. Il s'est ainsi progressivement imposé au détriment de la technique de réparation classique par tôles d'acier collées (Houhou, 2012).

Le comportement des structures confinées à l'aide de matériaux composites est complètement différent de celui des structures qui subissent un confinement conventionnel. En effet, à la rupture, le matériau composite présente un comportement fragile en opposition avec le comportement ductile de l'acier. Il devient alors nécessaire de bien comprendre le comportement du béton ainsi confiné.

L'intérêt sera porté, dans le cadre de ce travail, sur le confinement ou la réparation des colonnes en béton. Ce confinement est généralement réalisé à l'aide d'enveloppes en matériaux composites à base de fibres de verre, de carbone, aramide ou de bore. L'application de ces enveloppes aux colonnes permet l'amélioration de la résistance en compression, ainsi que la ductilité du béton confiné.

Le présent travail s'inscrit dans cette démarche de réhabilitation par les matériaux composites de structures en béton endommagées. Il se veut une solution intermédiaire aux deux cas suscités, à savoir le confinement par enveloppe entière et le confinement par cerces en FRP. Le procédé proposé dans cette étude consiste en le collage des plaques en polymère renforcé de différents fibres « CFRP, GFRP, Aramide, Bore » autour de cylindres en béton.

Les gains en résistance et en déformation axiale sont alors évalués et analysés en tenant compte de la rigidité et l'épaisseur de la plaque de renforcement et le diamètre de spécimens.

Une solution optimale de réhabilitation est recherchée en considérant la résistance à la compression initiale du béton non confiné ainsi que la résistance à la traction du FRP.

Notre travail s'articule autour de quatre chapitres, présentant chacun un aspect bien défini de la thématique étudiée qui porte sur les paramètres de réhabilitation par collage de matériaux composites sur le béton.

Le premier chapitre décrira, à travers une étude bibliographique les pathologies ainsi que quelque renforcement.

Le deuxième chapitre sera consacré à une revue d'ensemble sur les matériaux composites et leurs différentes propriétés.

Le troisième chapitre présente une illustration du comportement mécanique et de la pression de confinement exercée par une enveloppe composite sur le béton confiné avec ces matériaux. Le but est de montrer les tendances des relations contrainte-déformation et de comprendre d'avantage la mécanique de rupture du béton confiné avec des matériaux composites sous une compression axiale.

Le quatrième chapitre portera sur l'analyse mécanique dans les poteaux en béton armé renforcées par des plaques de matériaux composites hybride.

Enfin, ce travail est ponctué par une conclusion générale où sont rappelés les principaux résultats obtenus dans cette étude qui permet de souligner son efficacité dans la conception et le calcul relatif au renforcement des structures par matériaux composites et où sont données quelques propositions, en guise de perspectives, pour de futures recherches.

CHAPITRE I

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

I.1. Introduction

Les constructions évoluent, vieillissent et subissent des agressions diverses qui affectent inégalement les matériaux qui la constituent, Ils se fissurent, se désagrègent ou éclatent sous l'effet de sollicitations physiques, mécaniques et chimiques, donc la dégradation des ouvrages est inéluctable. Ainsi voit-on la stabilité des structures ou la santé des matériaux remise en cause.

Dans le secteur du génie civil ou de travaux publics, l'intégrité des structures en service dépend essentiellement de la variation de leurs résistances au cours d'exploitation. Les fissures dues aux sollicitations dynamiques ou statiques, sont la cause principale des défaillances. Il est donc nécessaire de protéger les structures, de les réparer et parfois de les renforcer.

Le principe de renforcement ou de réparation consiste à qualifier les zones où les sections qui sont trop sollicitées, certain par les dispositions adoptées ou du changement des conditions d'exploitations, d'autre par l'application des efforts supérieurs à ceux pris en compte dans les calculs (problème de renforcement), ou bien si la résistance a diminué par suite de dégradation (problème de la réparation).

Le présent chapitre se propose un panorama de l'essentiel des pathologies affectant les ouvrages en béton en les classant en fonction de leur origine chimique, physique ou mécanique ainsi que les différentes technologies de réparation et de renforcement couramment utilisées dont la technique de renforcement par matériaux composites.

I.2. Pathologies des ouvrages en béton armé

Au fil du temps, les structures en béton armé sont soumises à des déférents conditions d'environnement définies par la localisation géographique (pluie, gel, sels de déverglaçage, ...etc.) où elles recevoir des surcharges importantes.

Une étude des pathologies d'un ouvrage se décompose en plusieurs phases, commençant par une visite de l'ouvrage accompagné d'un relevé détaillé des différentes pathologies présentent sur les ouvrages. Puis, on procède à un diagnostic afin de connaître l'origine des pathologies pour préconiser d'une part le classement de l'état de l'ouvrage et d'autre part les travaux à réaliser.

Les pathologies les plus fréquemment citées sont classées en trois types :

* Pathologies dû à la dégradation des matériaux.

* Pathologies dû aux erreurs de conception ou de réalisation.

* Pathologies dû à la modification des conditions d'exploitation. [(Deghmane Y, Riou O).2018]

1.2.1. Dégradation des matériaux

Les désordres survenus au niveau des structures sont souvent dus aux dégradations des matériaux employés, Celle-ci commence par la dégradation des propriétés physiques, et plus précisément au comportement mécanique du béton et de l'acier en fonction des conditions environnementales déterminées par la situation géographique de l'installation.

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

- ✓ Érosion, abrasion, chocs
- ✓ Action des cycles de gel-dégel
- ✓ Altération physico-chimique du béton
- ✓ Retrait du béton
- ✓ Corrosion des armatures métalliques.

➤ Érosion, abrasion et choc

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



Figure I.1 : Erosion du béton [(Deghmane Y, Riou O).2018].

➤ **Action des cycles de gel-dégel**

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

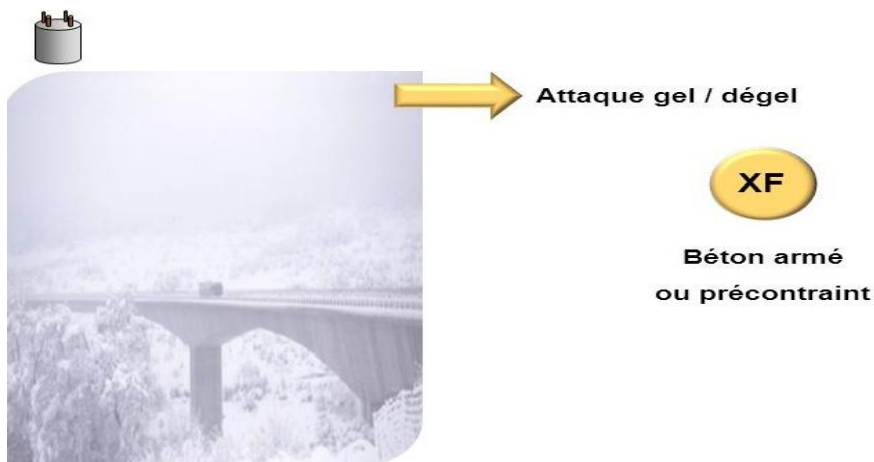


Figure I.2 : gel-dégel du béton [(Deghmane Y, Riou O).2018]

➤ **Altération physico-chimique du béton**

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

CHAPITRE I Pathologies et techniques de réparation des ouvrages en béton armé

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

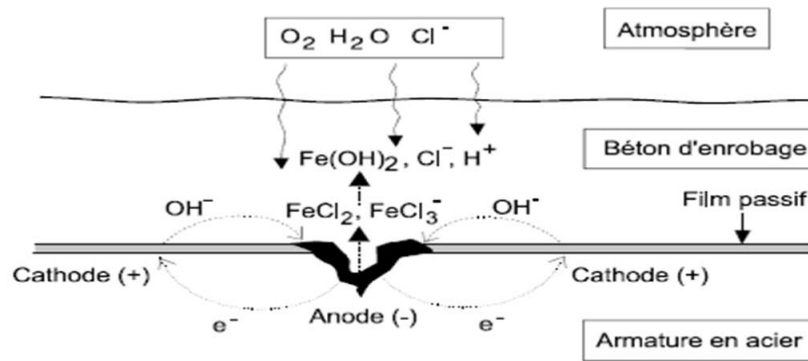


Figure I.3: Altération physico-chimique du béton [(Ndzana A).2007]

➤ Carbonatation des bétons

La carbonatation est un phénomène lent et naturel qui touche la plupart des matériaux de construction : bétons, mortiers, etc. Ces matériaux sont tous sensibles à l'action du CO_2 de l'atmosphère qui acidifie le milieu. La corrosion des armatures peut débuter dans le cas du béton armé.

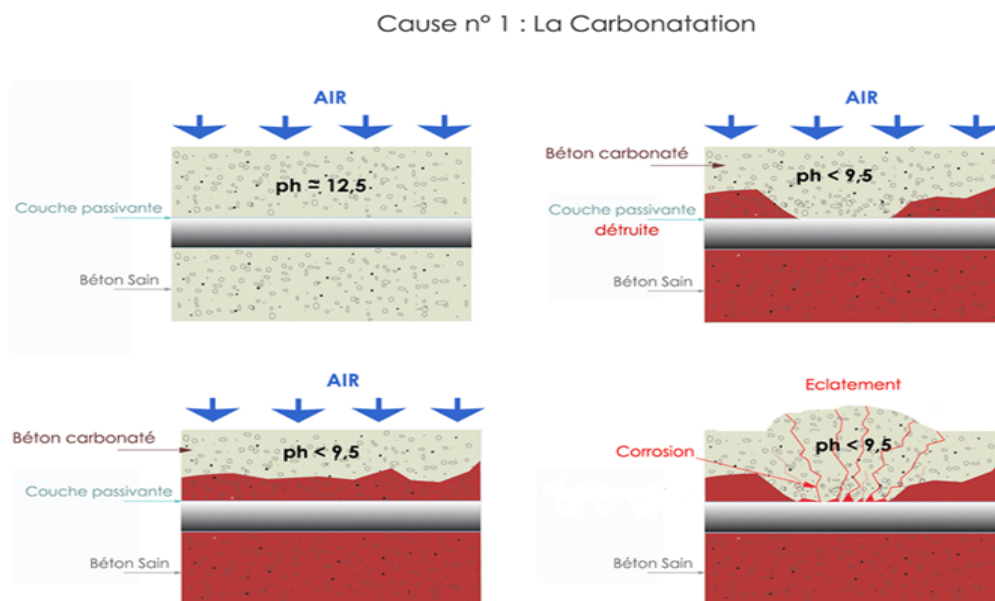


Figure I.4 : Carbonatation des bétons [(Deghmane Y, Riou O).2018].

➤ **Retrait du béton**

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



Figure I.5 : Retrait du béton [(Deghmane Y, Riou O).2018].

➤ **Corrosion des armatures métalliques**

Les différentes causes de fissuration des bétons décrites préalablement limitent la protection des armatures et favorisent la dégradation des aciers passifs ou des câbles de précontrainte en diminuant l'alcalinité du béton et en favorisant l'action des chlorures. Le gonflement des armatures, par formation de rouille, qui en résulte, a tendance à accélérer les mécanismes de fissuration du béton. **Figure I.6.**



Figure I.6 : Fissuration d'un poteau et une poutre en béton armé en milieu salin. [(Yahiaoui S).2006]

1.2.2. Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution

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

Dans le premier cas, les causes de fissuration et de dégradation de la structure sont généralement induites par de graves erreurs dans la vérification de la stabilité de l'ouvrage et des conditions de résistance ou, plus simplement, par la prise en considération d'hypothèses

erronées au niveau des conditions de chargement, d'environnement ou de fonctionnement de l'ouvrage.

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

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

Les erreurs d'exécution qui sont susceptibles de justifier une intervention au niveau de l'ouvrage portent sur les imperfections de coffrage, les défauts de bétonnage *Figure I.6*, les incohérences du ferrailage ou sur les conditions non satisfaisantes de décoffrage.



Figure I.7: Fissuration de poutres et de poteaux d'une structure âgée atteinte d'alcali réaction [(Yahiaoui S).2006]

1.2.3. Modification des conditions d'exploitation des ouvrages

En fonction de l'évolution du trafic, ou de la voirie, il est possible de justifier la nécessité de renforcer ou d'améliorer la portance d'un ouvrage. L'évolution des conditions de chargement est souvent induite soit par la modification des charges réglementaires sur essieux, soit par une modification de la fréquence des sollicitations qui s'exercent ou une sous-évaluation des charges d'exploitation. Il faut aussi évoquer la nécessité, dans certains cas, de prendre en considération des sollicitations extrêmes (climatiques ou accidentelles). C'est notamment le cas de la mise en conformité des ponts ou bâtiment vis-à-vis des sollicitations sismiques où un séisme, même léger, peut être la source de désordre importants

ou le renforcement de certains éléments de l'ossature (piles de ponts, poutres latérales) vis-à-vis de sollicitations accidentelles (chocs) telles que l'impact de véhicules [(Calgaro J, Lacroix R). 1997]. Notons que des tassements différentiels des fondations peuvent entraîner des fissurations.

I.3. Techniques de réparation et renforcement des ouvrages en béton armé

Le choix de la méthode de réparation et des matériaux à mettre en œuvre est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, en tenant compte des critères économiques des matériaux de construction, des conditions de chantier et des contraintes de site. Le principe de renforcement ou de réparation consiste en adjonction de matière dans les zones où les sections sont trop sollicitées. Une section devient trop sollicitée si, du fait même des dispositions adoptées ou du changement des conditions d'exploitations, les efforts appliqués sont supérieurs à ceux pris en compte dans les calculs (problème de renforcement), ou bien si la résistance a diminué par suite de dégradation (problème de la réparation). Il est possible de définir la maintenance comme l'ensemble des interventions qui ont pour but de prolonger la durée pendant laquelle l'ouvrage va procurer des avantages à la collectivité [(Llanoos J). 1992]. Parmi les interventions de maintenance, on peut distinguer :

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

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

I.3.1. Méthodes de réparation non structurales

L'existence de fissures au niveau d'un élément structural peut entrainer des désordres grave s'ils ont sous-estimé, qui peut atteindre une perte de portance ou bien un

dysfonctionnement qui influe sur l'ensemble de la structure, la distribution déséquilibré des efforts contribuent à la dégradation du béton et l'apparition des armatures de ferrailages, donc un contact direct des armatures avec l'atmosphère provoquant sa corrosion, et là on est dans un état avancé de gravité, donc les méthodes de reprise de ce béton dégradé doivent être appliquées si l'on veut éviter d'avoir recours dans l'avenir à des techniques de réparation et/ou de renforcement plus onéreuses et parfois plus délicates à mettre en œuvre. Et dans le cas d'utilisation de méthodes plus lourdes, ces méthodes légères seront utilisées afin de restaurer un bon état de surface.

La réparation par reprise du béton dégradé suit généralement l'ordre chronologique suivant : - préparation de la surface de béton à réparer, - traitement des armatures éventuellement exposées, - mise en œuvre d'un ou de plusieurs matériaux d'apport, - protection du parement ainsi réparé.

1.3.2. Méthodes de réparation structurales

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

1.3.2.1. Réparation par béton projeté

Cette technique, très au point, utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défaillantes que pour la réparation d'ouvrage endommagés (par exemple, pour réparer un bâtiment après un incendie), exige pour sa mise en œuvre un personnel spécialisé.

Cette technique consiste à projeter du béton convenablement dosé sur un support préalablement sablé. Sous l'effet de sa vitesse de projection et des accélérateurs de prise, ou raidisseurs, qui y sont inclus, le béton s'accroche très solidement sur le support et forme avec lui une structure homogène. Le béton peut être, ou non, combiné avec l'adjonction d'armatures complémentaires. Après durcissement, le béton projeté possède les propriétés d'un béton coulé, puis vibré [(**Resse C, Venaut M.** 1981)]. La projection est possible dans toutes les directions, en particulier en plafond *Figure (I.8)*.

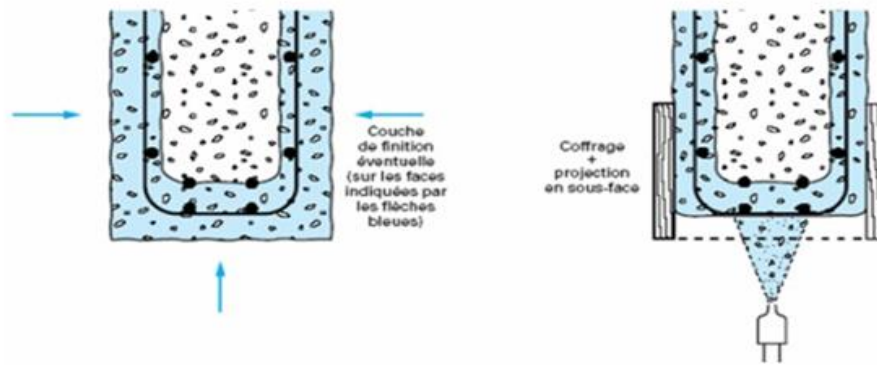


Figure I.8: Réparation de poutre par béton projeté. [(Resse C, Venaut M). 1981]

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

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

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

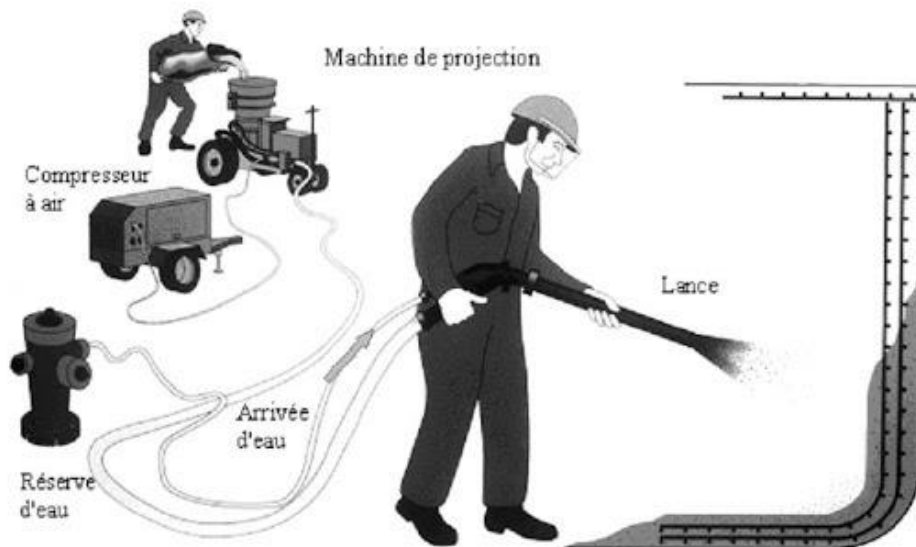


Figure I.9: renforcement au moyen de béton projeté en général

1.3.2.2. Réparation par Le chemisage

Le chemisage en béton armé consiste en une augmentation considérable des sections Par la mise en œuvre d'un ferrailage additionnel à l'ancien élément et d'un nouveau béton

d'enrobage pour favoriser l'accrochage, ce dernier sera mis en œuvre après la confection du coffrage. (*Figure I.10*).

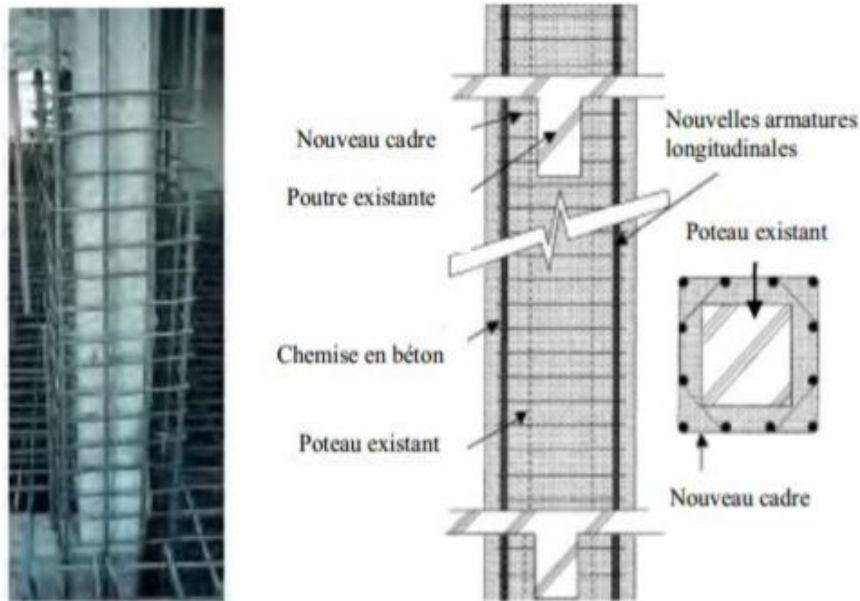


Figure I.10: Chemisage d'un poteau. [(NEZAR RAMZI),2018]

Tableau I.1: Avantages et inconvénients du béton chemisage en béton armé [(NEZAR RAMZI),2018]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Technique peu couteuse du fait des matériaux utilisés ; - Main d'œuvre peu qualifiée ; 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation considérable des sections donc du poids de la structure ; - Les éléments sont plus encombrants et moins esthétiques ; - Nécessité de mettre hors service l'ouvrage à renforcer pendant la durée des travaux qui est généralement longue ; - Transport des matériaux ; - Nécessité de coffrage ; - Mise en œuvre souvent difficile.

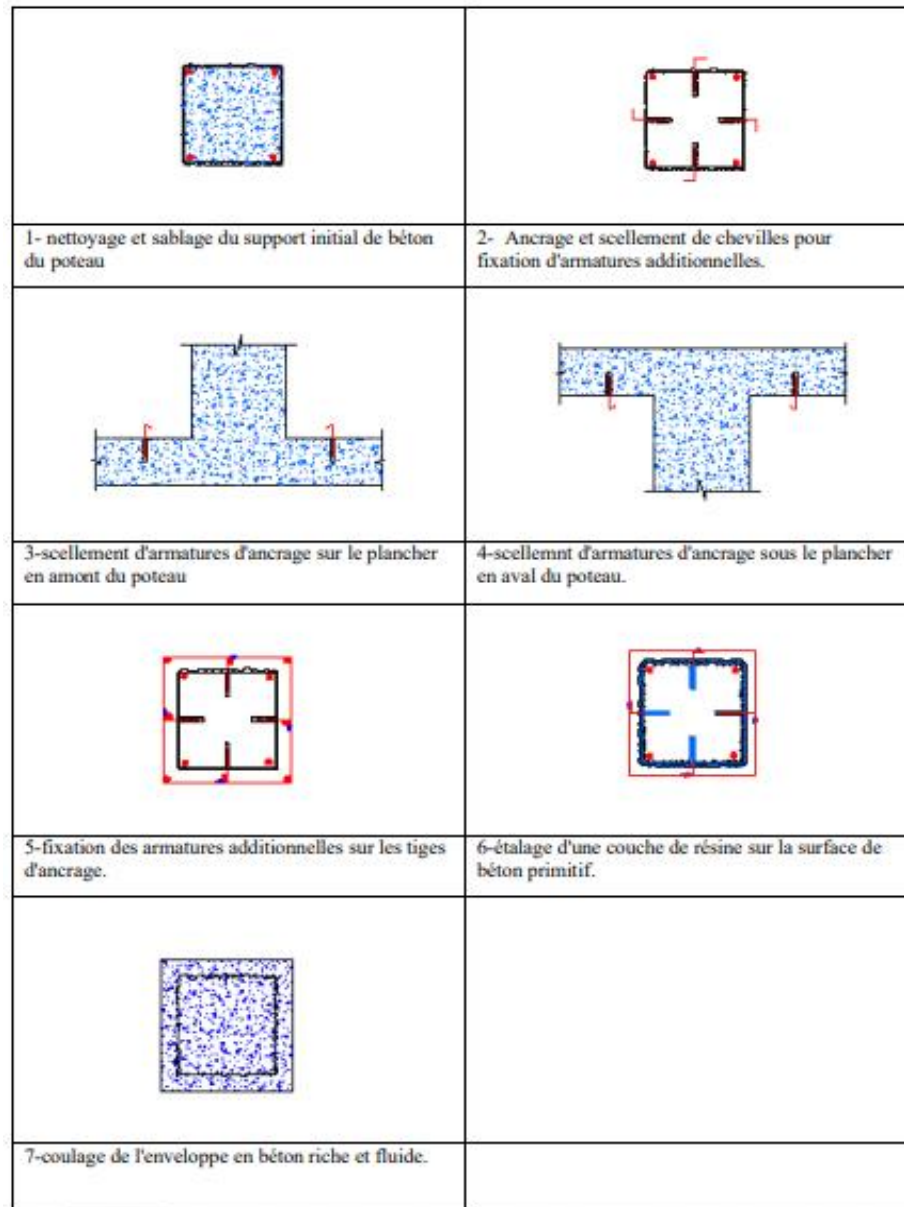


Figure I.11: Différents étapes de renforcement des poteaux au moyen d'une enveloppe en béton armé (chemisage) [(Belhannachi H).2009]

1.3.2.3. Réparation par adjonction d'armature complémentaire

Cette technique est basée sur l'ajout d'armatures pour remplacer l'acier corrodé ou renforcer la structure ; Ces armatures ajoutée traite les fissures et contribue à la résistance des sections renforcées nous protégeons le renforcement ajouté en par les couvrir par béton coulé ou projeté ; il y a une possibilité de liée les armatures anciennes et les nouveaux par le recouvrement ou la soudure. (*Figure I.12*).

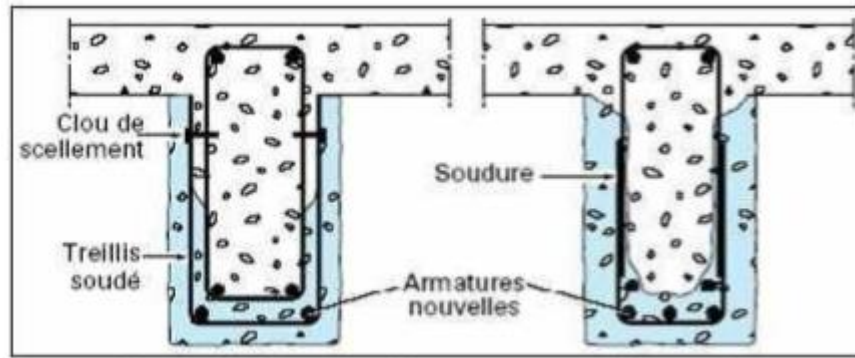


Figure I.12: Réparation de poutre par adjonction d'armature. [Aït Ameer Meziane.M.2008]

I.3.2.4. Réparation par précontrainte additionnelle

Le principe de cette technique est l'utilisation de câbles précontraints ou de torons gainés graissés pour donner une contrainte de compression à la partie tendue dans la section de la structure pour éliminer l'effet de la traction ou minimiser au moins.

Cette méthode est particulièrement adaptée au renforcement en flexion et vis-à-vis de l'effort tranchant par l'emploi d'étriers actifs (Figure I.13).

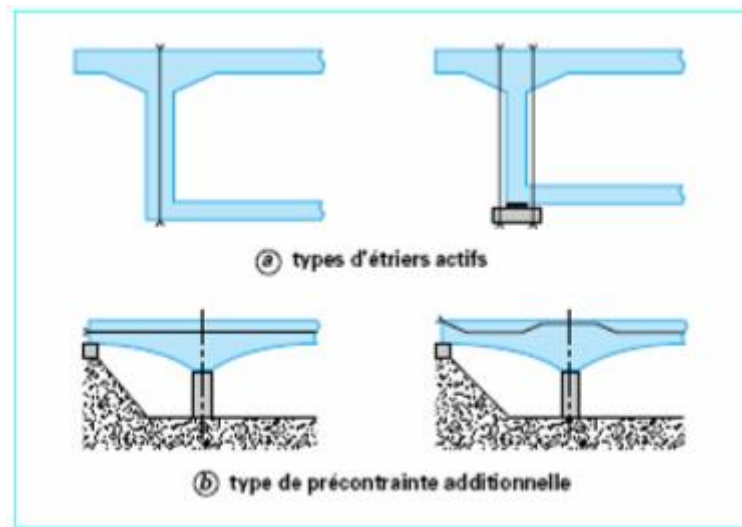


Figure I.13: Différents types de réparation par précontrainte additionnelle. [Aït Ameer Meziane.M.2008]

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

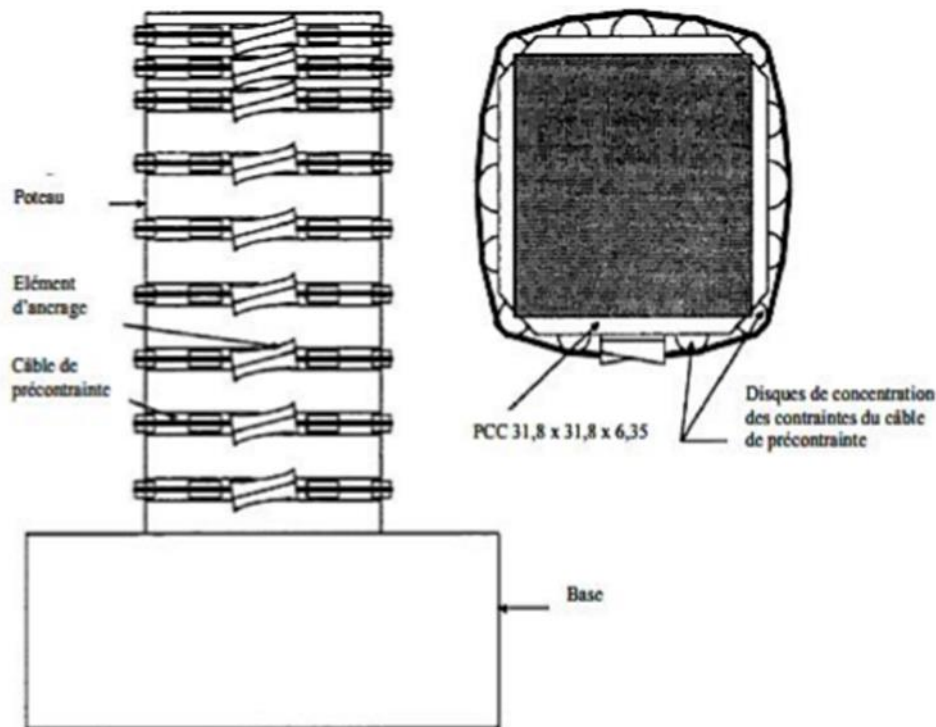


Figure I.14: Détail d'un renforcement d'un poteau carré par précontraintes additionnelles. [(Kherkhache S). 2013]

1.3.2.5. Renforcement par collage de plats métalliques

Le principe de cette technique est de relier la plaque d'acier à la surface du béton pour transférer les efforts et augmenter la résistance et la rigidité de la structure. Le renforcement de structure par plats métalliques, mieux connue sous le nom de procédé l'Hermite, consiste à coller des plats en acier sur les faces tendues de structures en béton armé. Ainsi, L'Hermite [(L'Hermite R). 1967] s'est intéressé, dès le début des années soixante, à l'utilisation de ces composés adhésifs de type époxy polymérisant à froid pour associer béton et acier.

D'après Theillout J.N [(Theillout J.N). 1997] .trois problèmes mécaniques se posent lors de l'utilisation de tôles extérieures collées au béton pour le renforcement des structures.

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

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

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

Ce procédé consiste en un apport d'armatures extérieures soit pour consolider un élément dont les dégradations mettent en péril la résistance, soit pour remplacer des aciers oubliés, ou mal positionnés. La préparation des surfaces, la mise en œuvre des colles, la réalisation du placage, etc., doivent impérativement être confiées à des entreprises spécialisées ou à des laboratoires du fait de la difficulté de la mise en œuvre de cette technique, certains procédés font d'ailleurs l'objet de brevets (ex. : brevet UTI-L'HERMITE, inventeur de la technique), **figure (I.15)**.

- ✓ La colle utilisée est, généralement, une résine époxyde. Son épaisseur est de 0,5 à 1 mm
- ✓ Les tôles d'acier, de qualité courante, ont une épaisseur limitée à 3 mm.

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

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



Figure I.15: Renforcement d'un viaduc par tôles collées. [(Boulaziz.A).2014],

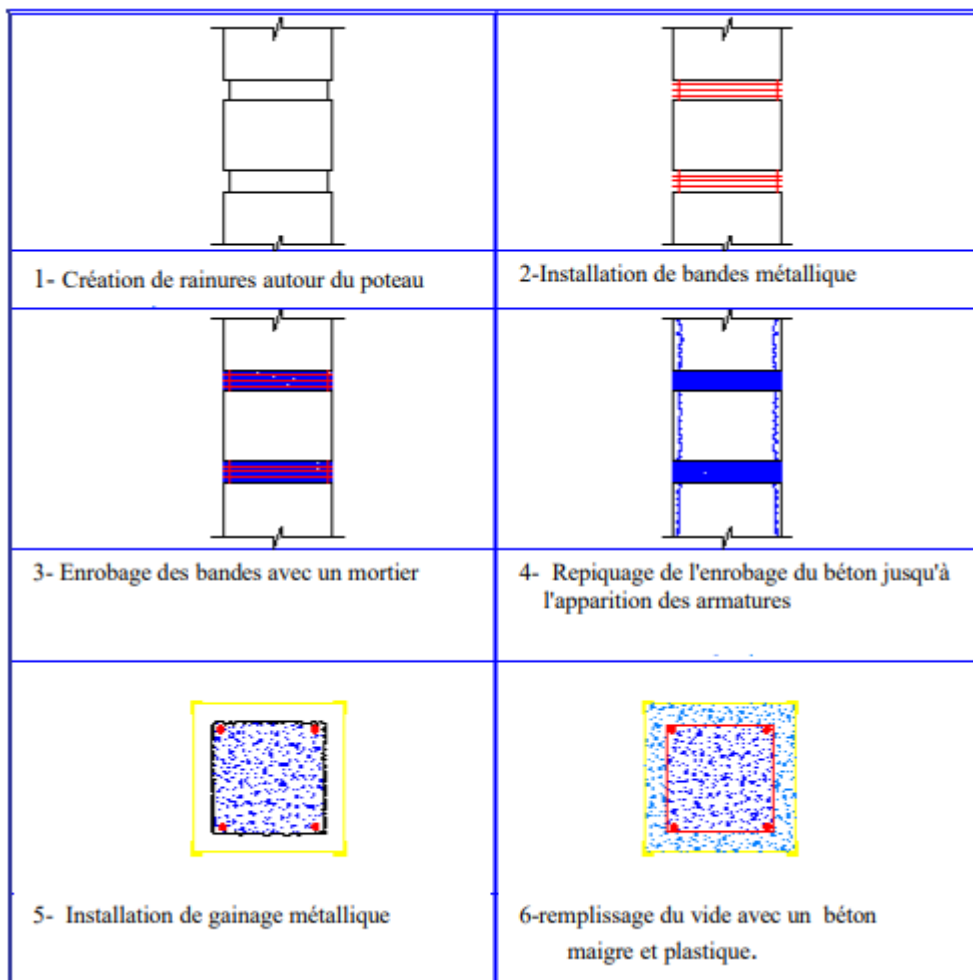


Figure I.16: Différents étapes renforcement d'un poteau par gainage métallique [(Belhannachi H).2009]

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients du tôle d'acier colle. [(NEZAR RAMZI).2018]

Avantage	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Courte durée de réalisation par rapport au chemisage en béton - Bonne performance des éléments renforcés (bonne ductilité) - Faible augmentation des sections. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coûts relativement élevé - Nécessite de soudure donc une main d'œuvre qualifiée - Problème de corrosion ce qui nécessite une face - Nécessite d'une préparation spécifique de la surface à traiter (la raideur des tôles nécessite une surface parfaitement plane pour assurer l'uniformité en épaisseur de l'adhésif). - Nécessite d'un collage sous pression (vérins) pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine de collage - Impossibilité de généraliser cette technique a des surfaces importantes (masses manipulées trop importantes). Ce qui limite d'autant les possibilités de réparation

1.3.2.6 : Réparation et renforcement par collage des matériaux composites

Au début on a mentionné que les enjeux économiques ont été à l'origine de la prise de conscience de l'importance de la maintenance et ainsi au développement des techniques de renforcement et de réparation. Les techniques traditionnelles ont montré leurs limites au comportement à long terme (oxydation des tôles d'acier, durabilité du béton) l'amélioration de la durée de vie de l'ouvrage est due aux propriétés des matériaux composites

Un matériau composite est l'assemblage de deux matériaux de nature différente, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Les matériaux composites sont composés de fibres noyées dans une matrice.

CHAPITRE I | Pathologies et techniques de réparation des ouvrages en béton armé

Une fibre est constituée de plusieurs filaments, élémentaires dont le diamètre est de l'ordre de 5 μ m. La fibre a un comportement élastique linéaire jusqu'à rupture les lois de comportement sont de type "élastique fragile".

Le comportement mécanique des matériaux composite dépend du type de fibres et de type des matrices, qui doivent être compatibles entre eux.

La matrice est le matériau qui donne le monolithisme à l'ensemble, et permet d'assurer le collage des fibres entre elles et transférer les efforts extérieurs à celles-ci. De plus la matrice joue un rôle très important pour résister aux efforts tranchants Par ailleurs elle protège les fibres en les isolant de l'humidité de l'oxydation et des agents agressifs chimiques [(J.V.MIRANDA).2004].

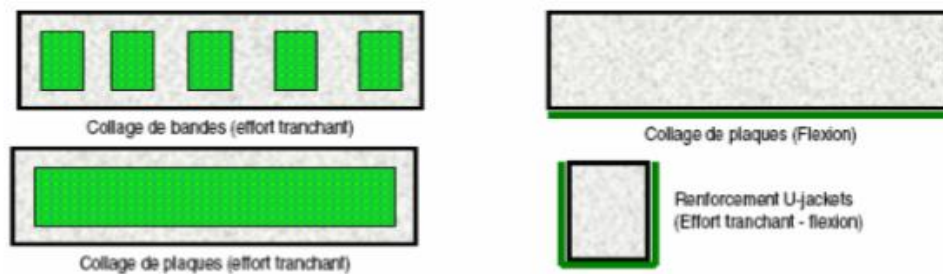


Figure I.17: Différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques en composites [(Perrier R, et al) .1996].



Figure I.18: Poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites. [(NEZAR RAMZI).2018]



Figure I.19: confinements d'un poteau au moyen de CFRP. [(Belhannachi H).2009]

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



Figure I.20: Mise en œuvre d'une réparation par stratification. [(Boulaziz,A).2014]

Les matériaux composites présentent des avantages indéniables qui justifient pleinement leur utilisation pour la réhabilitation des ouvrages du génie civil :

- ✚ Une légèreté 5 fois plus que l'acier.
- ✚ Une résistance 10 fois plus optimale que les platines.
- ✚ Une grande flexibilité avec une faible épaisseur.
- ✚ Une facilité de transport
- ✚ Un poids de l'ordre de 800gr le mètre carré (épaisseur d'environ 1mm)
- ✚ Une mise en place et un découpage à la forme désirée
- ✚ Une mise en œuvre aisée

- ✚ Adaptation aux supports
- ✚ Non sensibilité à la corrosion et d'autres attaques chimiques
- ✚ Meilleure résistance au feu et à la fatigue. [(Belhannachi H).2009]



Figure I.21: Mise en œuvre d'une réparation par matériaux composites. [(Amjad kreit).2012]

I.4. Conclusion

Cette recherche bibliographique sur la pathologie et les techniques de réparation des structures de génie civil, nous a permis de conclure que :

Le béton se dégrade sous l'action de nombreux facteurs. Compte tenu du coût des structures de génie civil, il est important de pouvoir les renforcer afin d'augmenter leur durée de vie.

Le renforcement des structures en béton armé par ajout d'armatures externes est une technique couramment utilisée depuis la fin des années 60. En effet, il est dans la plupart des cas plus rentable de réparer que de reconstruire.

Les multiples avantages, mécanique et physico-chimique de matériaux composites permet de les utilisés comme méthode de renforcement et de réhabilitation des structures en béton armé, et leur application est une alternative intéressante aux méthodes de réparation conventionnelle.

D'après les inconvénients des techniques de renforcement traditionnelles qui nécessite souvent de grandes moyens humains et matérielles pour une capacité assez limitée, les

CHAPITRE I| Pathologies et techniques de réparation des ouvrages en béton armé

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.

Chapitre II

*Généralité sur les
matériaux composites*

II.1. Introduction

Tandis que le remplacement d'une structure est généralement une solution coûteuse, les techniques de réhabilitation (réparation ou renforcement) fournissent des solutions de rechange attrayantes à la construction, diverses techniques de réhabilitation ont été développées, le béton projeté, la précontrainte additionnelle ou encore le collage de tôles d'acier.

Au début des années 90, La technique de renforcement par collage de plaques métalliques, a été remplacée par une méthode de renforcement par composites à base de diverses fibres, et au cours de ces dernières années, l'industrie de la transformation des matériaux composites a bénéficié d'une croissance rapide et régulière, soutenue en particulier par la diversité des applications.

De nos jours le collage des matériaux composites est l'une des méthodes de réhabilitation les plus utilisées. Les matériaux composites, appelés communément Polymères renforcés des fibres ou Fiber Reinforced Polymer (FRP), grâce à leurs caractéristiques mécaniques et physico-chimiques, se sont taillé une place très importante dans le domaine du génie civil. [(HAMELIN P, VARASTEHPOUR H).1995]

L'objet du présent chapitre est d'étudier plus particulièrement les matériaux composites et de mieux connaître les éléments constituant le composite afin de cerner avec exactitude leur intervention tant au niveau du composite lui-même qu'au niveau de la structure renforcée.

II.2. Définition de composite

Aujourd'hui Les matériaux composites se développent dans pratiquement tous les domaines et sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de haute technologie. Ils sont des matériaux à hautes performances mécaniques, façonnables à volonté au gré du concepteur et donc doué d'un potentiel illimité.

Dans un sens large, le mot "composite" signifie "**constituer de deux ou plusieurs parties différentes**". En fait, l'appellation matériau composite ou composite est utilisée dans un sens beaucoup plus restrictif. Généralement, Un matériau composite est une association intime d'au moins deux corps non miscibles à structures différentes dont les qualités individuelles se combinent et se complètent en donnant un matériau hétérogène dont les performances globales sont supérieures à celles des composants pris séparément [Berthelot J. 2012]. Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au tableau (II-1).

On distingue deux sortes de matériaux composites structuraux : les stratifiés et les sandwichs :

*Une structure sandwich est formée généralement de trois composants possédant des propriétés différentes, mais complémentaires : les peaux, l'âme et l'adhésif.

*Les stratifiés sont formés de plusieurs couches élémentaires appelées monocouches. En effet, les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite, et sont formées d'une matière plastique (résine, matrice) renforcée d'un matériau fibreux (renfort). Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases. Les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues et qui sont noyées dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible [Meir U. 1995]. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice conserve la disposition géométrique des fibres et assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques.

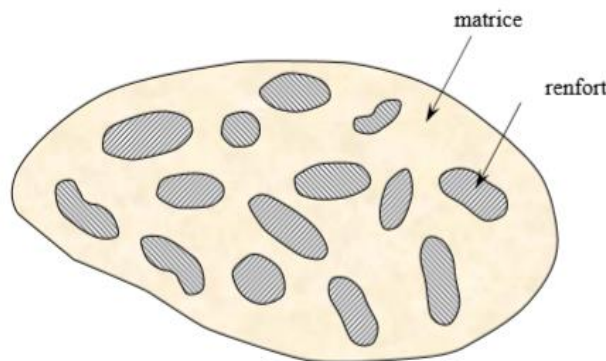


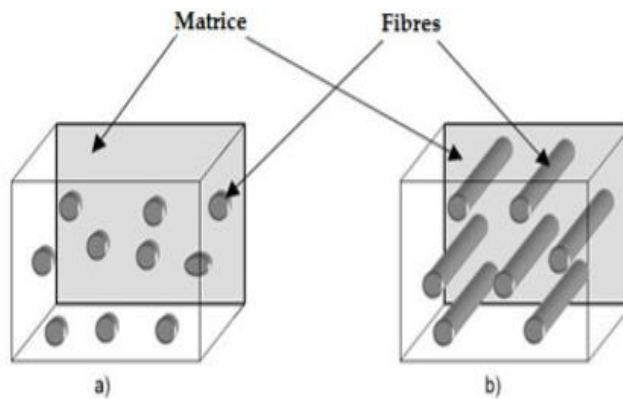
Figure II.1: matériaux composites [Jean-Marie Berthelot]

Tableau II.3 : les différents types de composites [(Belhannachi H).2009]

Type de composite	Constituants	Domaine d'application
1/composites à matrice organique	-résine/fibre cellulosique	-imprimerie
-papier	-résine/copeaux	-bâtiment
-carton	-résine/tissus	-toitures
-panneaux de fibres toiles enduites	-élastomère	-automobile
-matériaux d'étanchéité et pneumatique	-Caoutchouc/ acier	

<p>2/composites à matrice minérale</p> <p>-bidon</p> <p>-composite- carbone.</p>	<p>-Ciment/sable/granulats</p> <p>-Carbone/ fibres</p>	<p>-génie civil</p> <p>-aviation</p> <p>-espace</p>
<p>3/composites à matrice métallique</p>	<p>-Aluminium/fibre de bore</p> <p>-Aluminium/ fibre de carbone</p>	<p>Aérospatial</p>

Le renfort est souvent de nature filamenteire (des fibres organiques ou inorganiques) bien que la matrice généralement est une matière plastique (résine thermoplastique ou thermodurcissable). La **Figure II.2** montre que les matériaux composites peuvent comporter des avec particules ou des fibres.



*Figure II.2: matériaux composites : a) composites renforcés avec particules.
b) composites renforcés avec des fibres
[(Benarbia Dj).2018]*

II.3. Avantages et inconvénients des matériaux composites

➤ Avantages :

- Gain de masse.
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques)
- Grande résistance à la fatigue.
- Faible vieillissement sous l'action de la corrosion.
- Insensibles aux produits chimiques « mécaniques » comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvant, pétrole.

➤ Inconvénients :

- Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température.
- Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes.
- Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques.
- Meilleure tenue au feu que les alliages mais émission de fumées parfois toxiques pour certaines matrices.
- Coûts parfois prohibitifs, le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries.

II.4. Les éléments constituant le matériau composite a base des fibres (les fibres, les résines)

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 II-3*).

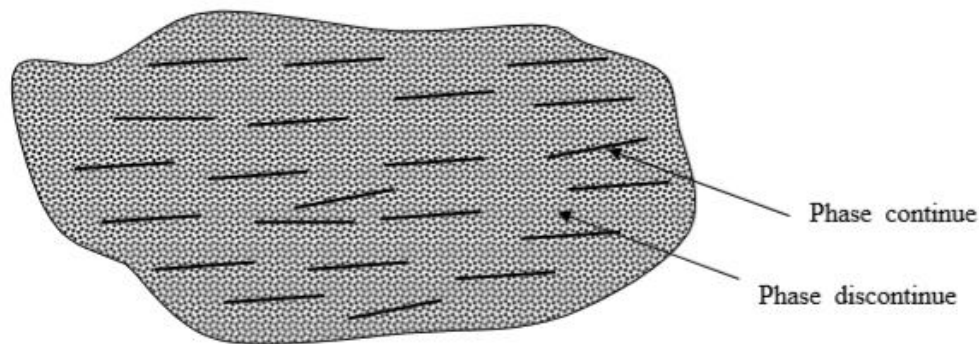


Figure II.3: Définition des types de composites [(Belhannachi H).2009]

Les matériaux composites structuraux sont principalement constitués de deux phases :

- Le renfort : son rôle est d'assurer la fonction mécanique. Il se présente généralement sous la forme des fibres dont l'orientation au sein du composite dépend de la sollicitation mécanique qu'elle doit supporter.
- La matrice : son but est de réaliser la liaison entre les renforts, leur protection vis-à-vis des agents agressifs et la prévention contre une rupture catastrophique. D'une manière générale, les matériaux composites structuraux de par la nature du renfort sont fortement anisotropes, c'est-à-dire que leurs propriétés sont très différentes suivant la direction considérée. D'autre part, les matériaux composites sont légers, c'est-à-dire que les masses

volumiques de leurs constituants sont de l'ordre de 1 à 3.5 g / cm³. [Ait Aneur Meziane.M.2008]

II.4.1. LES RENFORTS

Le renfort est tout simplement le squelette ou l'armature du composite ; et se présente sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue. Ainsi les fibres sont constituées par plusieurs milliers de filaments de diamètres variant de 5 à 25 µm. Il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc. Il permet aussi d'améliorer certaines propriétés physiques : comportement thermique, tenue en hautes températures, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc. Les caractéristiques recherchées pour le renfort sont : les caractéristiques mécaniques élevées, masse volumique faible, bonne comptabilité avec les matrices, facilité de mise en œuvre, faible coût.

La concentration du renfort à l'intérieur du matériau est mesurée par sa fraction volumétrique (V_f). Le renfort est sous forme lamellaire, granulaire ou fibreuse. Ces derniers se présentent suivant trois modes de mise en œuvre :

- Les fils : unidirectionnels : toutes les fibres sont orientées suivant une même direction.
- Les tissus : bidirectionnels : les fibres sont placées selon deux directions perpendiculaires.
- Les mats : multidirectionnels : les fibres sont dans tous les sens. [(Yahiaoui S).2006]

Les principaux matériaux de renfort sont :

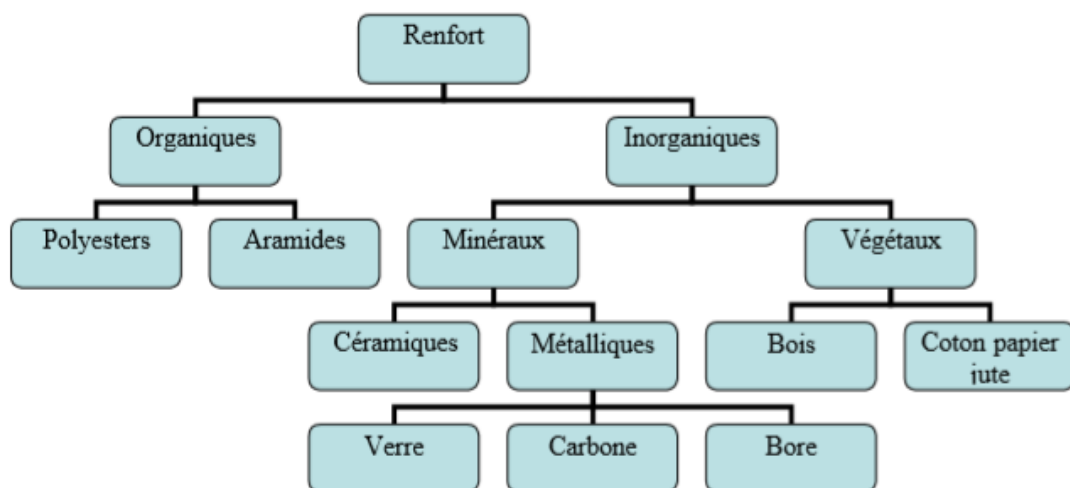


Figure II.4: Principaux matériaux de renforts [(Belhannachi H).2009]

Parmi les principales fibres on trouve les fibres de verre, les fibres de carbone et les fibres d'aramide (Kevlar).

➤ **La fibre de verre**

Est un filament de verre extrêmement fin (de l'ordre de 10 micromètres). Elle est obtenue à partir de silice et d'additifs. Suivant les applications auxquelles elles sont

Destinées, les fibres de verre sont réparties en trois qualités :

- Fibres E pour les composites grandes diffusions (GD) ;
- Fibres D pour les applications dans la construction électrique (circuits imprimés) ;
- Fibres R et S pour les composites hautes performances (HP).

Les fibres de verre constituent le principal renfort, utilisé dans plus de 95% des matériaux composites, et plus particulièrement pour les produits de grande diffusion (GD).

Le verre possède un excellent rapport de performance mécanique vis-à-vis de son prix à cause du coût de production peu élevé par rapport aux autres types. [(DORLOT J.M, BAILLON J.P, MASOUNAVE J).1986], rapportent que le pourcentage de silice que contiennent ces fibres contrôle leurs performances mécaniques et leur température d'utilisation. On distingue plusieurs types de fibres de verre. Le tableau III.1 donne quelques propriétés de deux types de fibres, le type E et le type S, comme le suggère [(AGRAWAL B.D., BROUTMAN L.J).1990].

Tableau II.4: Propriétés des fibres de verre type E et S [(Benarbia Dj).2018]

Propriétés	Verre type E	Verre type S
Densité (g/cm ³)	2.45	2.49
Résistance à la traction (MPa)	3448	4585
Module d'élasticité (GPa)	72.4	85.5
Diamètre possible (µm)	3-20	8-13
Coefficient de dilatation thermique 10 ⁶ /°C	5.0	2.9

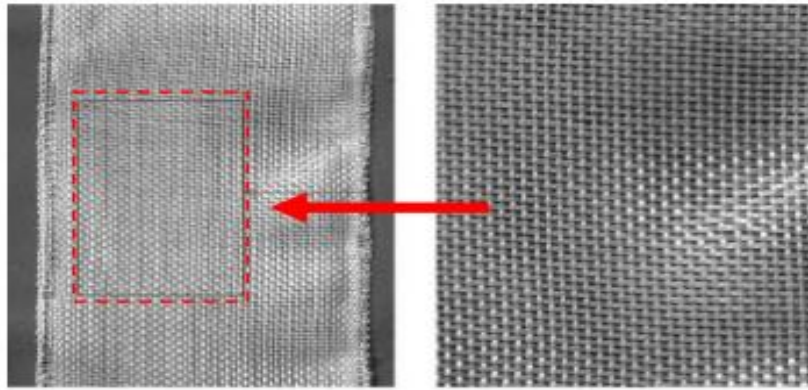


Figure II.5 : Tissue de fibres de verre. [(J. Li, M.N.S. Hadi).2003]

➤ **Fibres de Carbone :**

Les fibres de carbone sont apparues depuis le dernier siècle. Elles étaient extraites d'éléments organiques naturels. Ces fibres sont fabriquées de fibres inorganiques en carbonisant des fibres de polymères tressés appelés PAN.

On distingue deux types de fibres :

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

[(C.A.R.M.A).2004]

La fibre de carbone se compose de fibres ayant un diamètre moyen de l'ordre de 7 à 8 micromètres et constituée principalement d'atomes de carbone. Ces atomes sont arrangés dans des cristaux microscopiques selon une chaîne hexagonale comme le montre **la FigureII.5** Cet arrangement des cristaux rend la fibre extrêmement résistante. Plusieurs milliers de fibres de carbone sont enroulées ensemble pour former un fil, qui peut être employé tel quel ou sous forme de tissu.

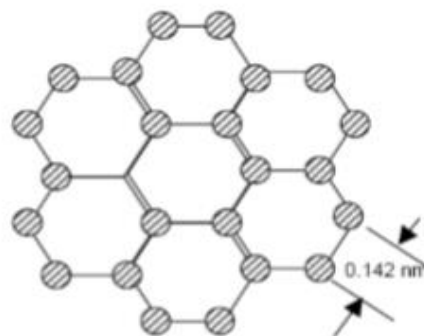


Figure II.6: Organisation hexagonale du tissu des atomes de Carbone. [(Benarbia Dj).2018]

Selon le pourcentage de carbone qu'elles contiennent, on distingue les fibres de carbone, 90 à 98 %, et les fibres de graphite, au-delà de 99%. Les deux types sont à très haute résistance à la traction et leur module d'élasticité est très élevé. Elles sont utilisées pour fabriquer des FRP à haute performance. C'est pendant la cuisson qu'on peut contrôler la résistance et le module d'élasticité du produit final.

Tableau II.5: Résumé quelques propriétés des fibres de carbone (HR et HM) : [(Benarbia Dj).2018]

Propriétés	Carbone HR	Carbone HM
Densité (g/cm³)	1.78	1.80
Résistance à la traction (MPa)	3500	2200
Module d'élasticité (GPa)	200	400
Allongement a la rupture	1.0	0.5

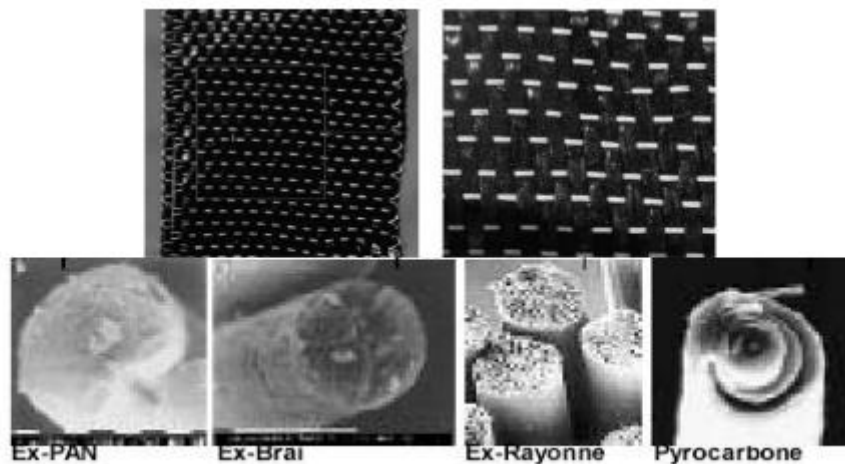


Figure II.7: Fibres de carbone. [(J. Li, M.N.S. Hadi).2003]

➤ **Fibres d'Aramides :**

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones mais leurs résistances 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, des enzymages des fibres peuvent être utilisé. L'appellation commerciale des fibres d'aramide est le Kevlar qui est une marque d'origine de la compagnie Dupont De Nemours. Elles sont, par ailleurs, très utilisées dans l'industrie pneumatique.

Les fibres d'aramide sont en général très résistantes et ont un module d'élasticité très élevé. Selon RIGAL, on distingue deux types de fibres d'aramide : le Kevlar 29 et le Kevlar 49. Le type 29 est utilisé surtout pour la fabrication de FRP alors que le second sert à confectionner des câbles et des cordes. Le tableau II.4 montre quelques propriétés des fibres d'aramide telles que mentionnées par AGARWAL et al.

Tableau II.6: Propriétés des fibres d'Aramides. [(AGRAWAL B.D., BROUTMAN L.J).1990].

Propriétés	Kevlar 29	Kevlar49
Densité (g/cm ³)	1.44	1.44
Résistance à la traction (MPa)	2760	3620
Module d'élasticité (GPa)	62	124
Allongement a la rupture	3-4	2-8



Figure II.8: Fibres d'aramide. [(Kherkhache S). 2013]

Le graphe de la **Figure II.9** compare la résistance en traction de différentes catégories de fibres.

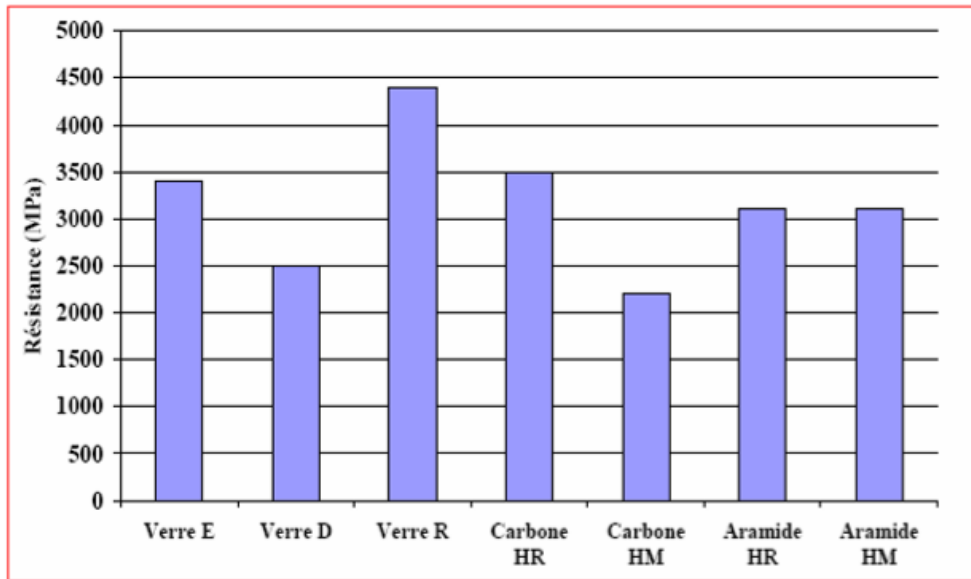


Figure II.9: Histogramme des résistances à la rupture en traction des fibres. [Ait Ameer Meziane.M.2008]

Les trois fibres sont utilisées dans les structures de génie civil, mais pour le renforcement, les composites à fibres de carbone se sont imposés par leurs caractéristiques mécaniques.

II.4.2. Les matrices

Les matrices servent à enrober les fibres et à les lier afin d'assurer le transfert des charges. Elle assure également une protection chimique. Les matrices doivent présenter une bonne compatibilité avec le renfort. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées. Leurs propriétés mécaniques sont négligeables par rapport à celles des fibres. On distingue deux types de matrices : les matrices organiques et les matrices inorganiques. Le choix d'un type ou d'un autre dépendra des propriétés et des conditions d'utilisation des fibres. Les matrices organiques sont, en général, à base de polymères. Elles peuvent être thermoplastiques ou thermodurcissables. Les premières peuvent être réutilisées après une nouvelle fusion alors que les secondes subissent un procédé de fabrication initial irréversible.

Les résines thermodurcissables sont surtout utilisées avec de fibres longues et les thermoplastiques avec de fibres plus courtes. Les principaux avantages des matrices organiques, en général, sont le faible coût de production, la faible densité de volume, la bonne maniabilité et la grande résistance chimique. Les matrices inorganiques sont à base de matériaux métalliques ou céramiques. Elles sont moins utilisées et servent en général dans s applications à des températures supérieures à 300°C. Les principales matrices ou résines

utilisées sont : les résines époxy, les polyamides, les polyéthers, les polyesters, les vinylesters, les phénoliques et les polyuréthanes. [(Benarbia Dj).2018]

La classification des types de matrices couramment utilisées est donnée sur la **Figure II.7**.

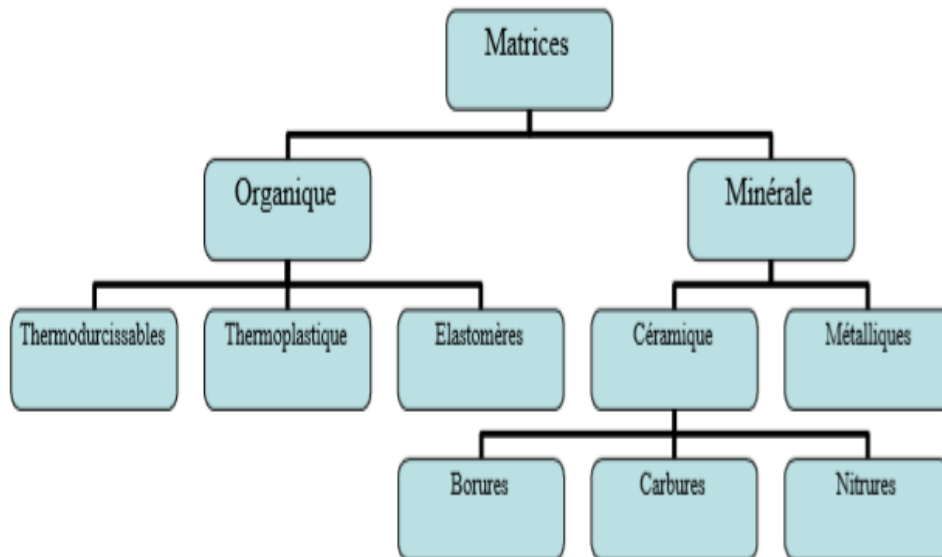


Figure II.10: Organigramme des différentes familles de matrice. [(Belhannachi H).2009]

III.4.2.1. Résines thermodurcissables

Les matrices les plus utilisées dans les composites sont les résines thermodurcissables car la mise en œuvre est alors plus accessible, surtout dans le cas de grandes pièces, que dans le cas d'une résine thermoplastique.

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, amioplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables. Les exemples de résines thermodurcissables classiquement rencontrées sont 914, 5208, 70, LY556. Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau II.5.

Tableau II.7: Caractéristiques des résines thermodurcissables [(Benarbia Dj).2018]

Résines	T _f (°C)	ρ (Kg/m ³)	ε _t ^R (%)	σ _t ^R (MPa)	σ _c ^R (MPa)	E (GPa)
Polyesters	60 à 100	1140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2.8 à 3.6
Phénoliques	120	1200	2.5	40	250	3 à 5
Epoxydes	290	1100 à 1500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

II.4.2.2. Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. Les résines thermoplastiques classiquement rencontrées sont PEEK, K3B. De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible ces dernières sont présentées dans

Tableau II.8: Caractéristiques des résines thermoplastiques [(Benarbia Dj).2018]

Résines	T _f (°C)	ρ (Kg/m ³)	σ _t ^R (MPa)	E(GPa)
Polyamide	65 à 100	1140	60 à 85	1.2 à 2.5
Polypropylène	900	1200	20 à 35	1.1 à 1.4

II.3.2.3. Comparaison entre ces deux types de résines

Tableau II.9: Comparaison entre les deux types de résines. [(Belhannachi H).2009]

Matrices	TP (thermoplastiques)	TD (thermodurcissables)
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage	Illimité	Réduit
Mouillabilité des renforts	Difficile	Aisée
Moulage	Continue Chauffage + refroidissement	Chauffage
Cycle	Court	Long (polymérisation)
Tenue au choc	Asses bonnes	Limitée
Tenue thermique	Réduite	Meilleure
Chutes et déchets	Recyclables	Perdus ou utilisés en charges
Conditions de travail	Propreté	Emanations de solvants

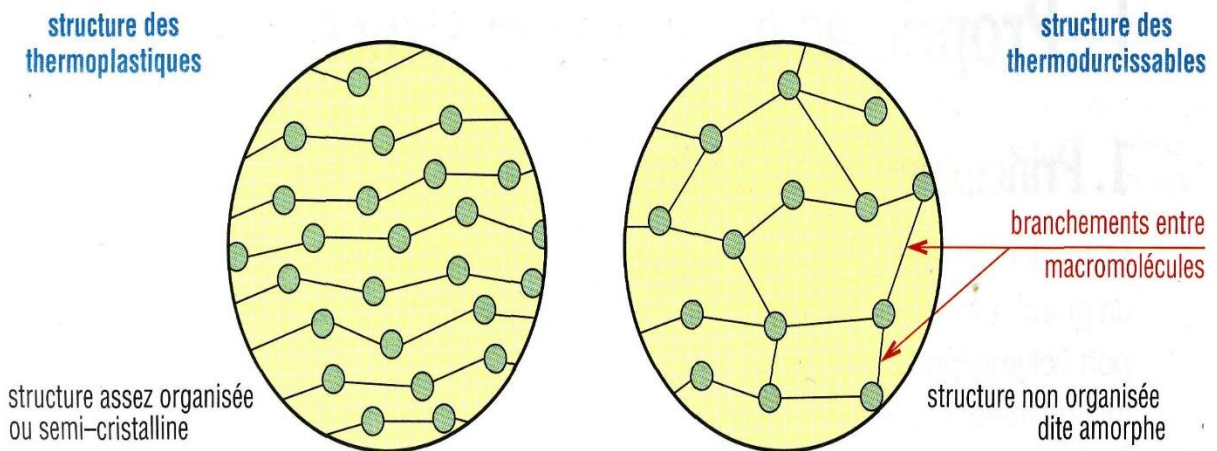


Figure II.11: Comparaison entre les deux types de résines.[site web/1]

II.5. L'utilisation des composites dans le domaine de génie civil

L'éventail des applications des matériaux composites est très large :

Bâtiments et travaux publics : habitations, cheminées d'usine, piscines, coffrages, cloison, portes, sanitaires...

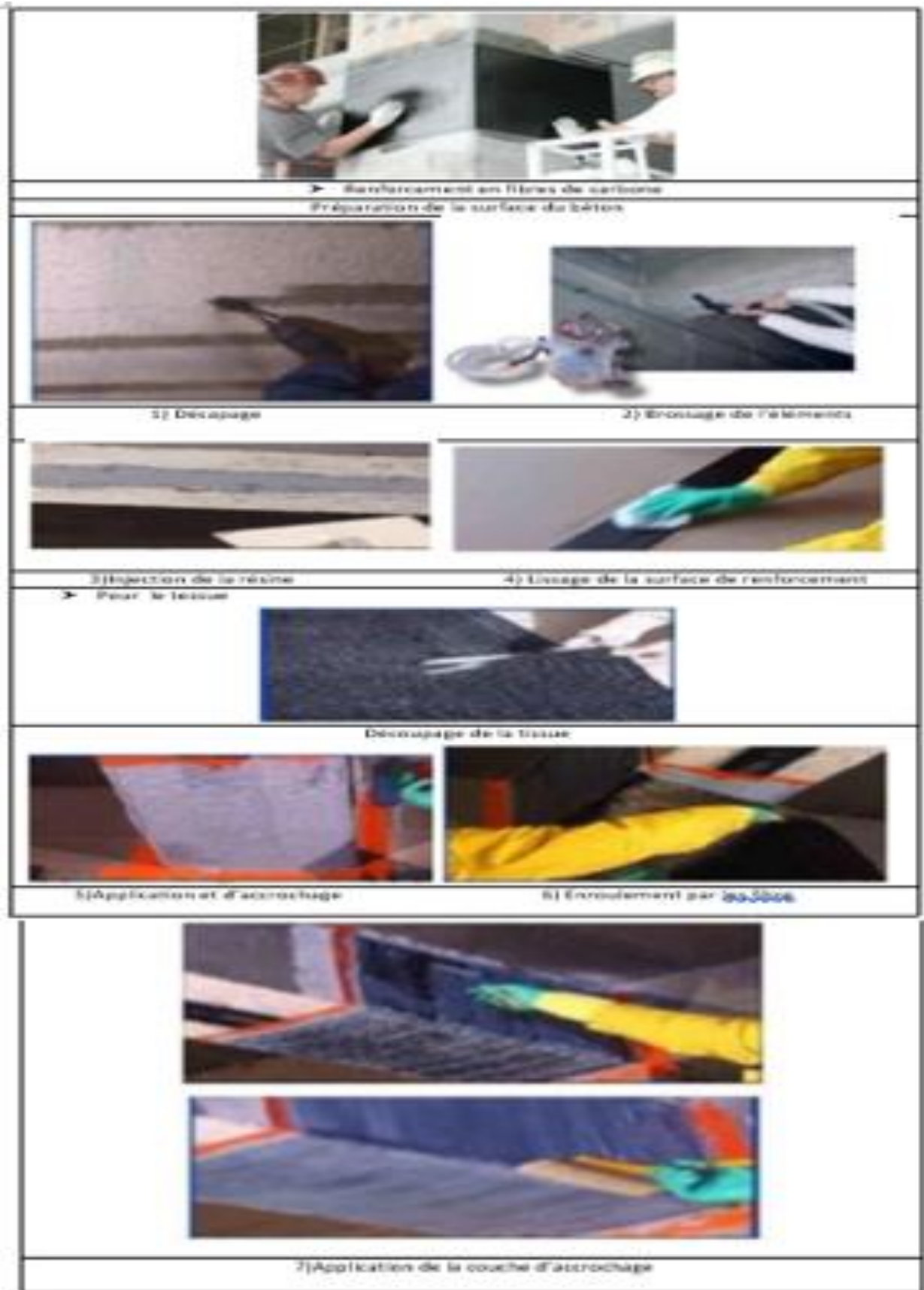


Figure II.12 : Applications des composites en génie civil [(Ahmed Touati).2018]

II.5.1. Composites dans les bâtiments

Les performances recherchées dans ce domaine sont :

II.5.1.1. Mécanique

L'amélioration des qualités des mortiers et bétons de ciment par l'adjonction de fibres divers, a donné le béton armé et précontraint, l'amiante, ciment et le béton plaqué ... etc. Le renforcement n'est efficace que si certaines conditions de déformabilité relative permettent de transmettre aux fibres des efforts en rapport avec leur résistance, les conditions thermiques extrêmes, doivent être compatibles avec les coefficients de dilatation, modules d'élasticité et résistances mécaniques des matériaux associés. L'amélioration de la résistance du béton à l'usure peut être obtenue par des revêtements superficiels de plastique chargés ou l'adjonction de poudres très dures (carborundum) au béton. [(Yahiaoui S).2006]

II.5.1.2-Amélioration de la sécurité

La rupture d'un produit utilisé dans le bâtiment peut ou non être dangereuse. Il est souvent nécessaire pour diverses raisons, que la mise hors service d'un élément de structures ne se traduit pas par la chute de pièces ou de morceaux dangereux. Dans cette classe, on peut trouver les verres armés, les vitrages de sécurité, divers produit verriers destinés aux alliages de fenêtres. [(Yahiaoui S).2006]

II.5.1.3.Amélioration de certaines propriétés physique

Dans cette catégorie, on trouve les associations de matériaux capables de remplir une fonction déterminée. Par exemple, le panneau d'allège qui est imperméable à l'eau et à l'air, il a un coefficient de transmission thermique K donné, une bonne résistance mécanique aux efforts statiques et aux chocs ainsi qu'un aspect décoratif, tant pour la face intérieure que pour la face extérieure. Il a aussi une bonne résistance aux agents agressifs extérieurs et intérieurs et une bonne tenue au gel et aux effets de l'insolation. [(Yahiaoui S).2006]

II.6. Conclusion

De ce qui précède nous pouvons retenir que les matériaux composites sont des matériaux très variés, disponibles partout, dans la nature. Ils sont un matériau fabriqué afin de répondre à une exigence désirée par le concepteur et ce contrairement aux matériaux traditionnels.

Cette diversité mérite d'effectuer des investigations dans le choix des constituants (la matrice, le renfort, les charges et les additifs) afin d'avoir les meilleures qualités qui dépendent :

- Des propriétés des matériaux constituants.
- Des distributions géométriques des constituants.
- De l'interaction entre les différents constituants, ...etc.

Le choix de ces matières, la technique et le procédé de fabrication à une influence directe sur l'architecture et le comportement mécanique du matériau.

Le fait de connaître les propriétés de ses constituants contribue dans la compréhension du comportement du matériau composite lui-même, ainsi la nature, la résistance le nombre de couches, l'orientation et le pourcentage volumétrique des fibres ; l'origine de la matrice et sa capacité de déformation influent sur les caractéristiques intrinsèques du FRP.

Notre étude a été axée particulièrement sur les composites à fibre de verre, de carbone et d'aramide car ils constituent les matériaux les plus utilisés dans le domaine de génie civil.

Chapitre III

*Comportement des poteaux en
béton armé confinés par composite*

III.1. Introduction

En Algérie comme ailleurs dans le monde, une grande partie du patrimoine national et des structures ont hâte la fin de leur durée de vie utile. Des études et expertises ont montré l'urgence de développer des techniques de réhabilitation permettant de redonner aux structures telles que les anciens édifices et les ponts...etc. Les capacités structurales nécessaires pour résister aux sollicitations auxquelles elles sont soumises. Parmi les techniques envisagées, l'utilisation des matériaux composites est très prometteuse. L'une de ces méthodes consiste à améliorer le comportement mécanique des colonnes en béton armé par l'application d'un confinement réalisé par l'enroulement et le collage externe d'une enveloppe en matériaux composites.

Les techniques de renforcement de structures en béton armé par collage de polymères renforcés de fibres (FRP) trouvent un important champ d'applications dans le renforcement des poteaux en béton armé. Le chemisage par FRP confine le noyau du poteau et permet d'augmenter sa résistance et sa ductilité, offrant ainsi une meilleure flexibilité au concepteur.

Le travail présenté s'inscrit dans l'optique de faire ressortir leur performance structurelle. Il consiste en la présentation d'une synthèse sur les principaux modèles caractérisant les lois de comportement du béton confiné par matériaux composites, tout en mettant en évidence les paramètres influents. Une investigation numérique faisant ressortir la capacité sectionnelle d'une section en béton renforcée par collage de FRP a aussi été menée. Les résultats obtenus ont permis la comparaison avec ceux obtenus par des codes de notoriété internationale.

III.2. Méthodes de confinement

Ils existent plusieurs techniques pour confiner les colonnes existantes en béton armé en utilisant des composites FRP [(Hamelin).2002]. Trois méthodes sont les plus utilisées à savoir : la stratification directe, l'enroulement filamentaire et le chemisage par coquille préfabriquée en FRP.

III.2.1. Stratification au contact

La stratification directe est la technique la plus utilisée pour le renforcement des colonnes en utilisant les composites FRP (Figure III.1). Dans cette méthode, les draps de fibres unidirectionnelles ou tissées sont imprégnés par les résines du polymère et enveloppés ensuite autour des colonnes dans un processus de moulage au contact, avec l'orientation des fibres principales dans la direction de confinement.



Figure III.11: confinement des poteaux par stratification directe [(WBAC).2003]

La polymérisation se fait à température ambiante (le renfort atteint sa résistance totale au bout d'une semaine) selon les étapes résumées dans **la figure III.3**.

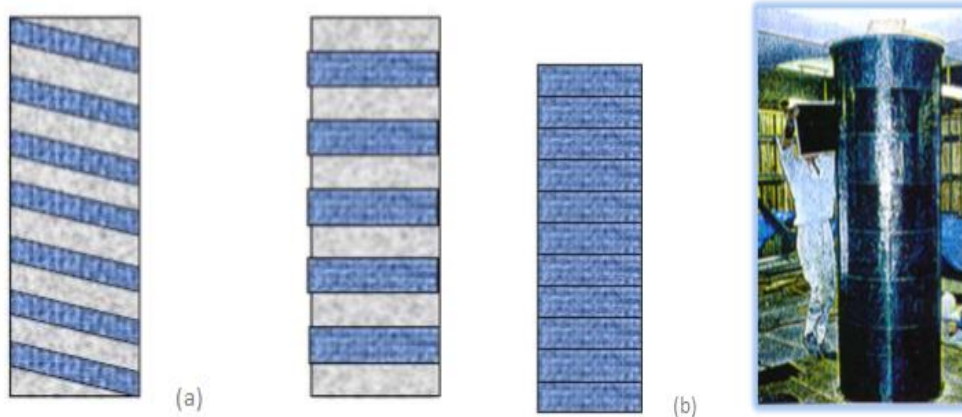
➤ **Traitement de surface**

Cette étape permet d'obtenir des caractéristiques mécaniques élevées à court terme. Après avoir ragréé la surface de béton (sablage, application d'un mortier polymère). Aussi le traitement de surface a pour but d'optimiser les performances du renfort en améliorant l'adhérence sur le béton et en éliminant les angles saillants qui conduisent à des concentrations de contraintes et donc une rupture prématurée du renfort, le rayon de l'arrondi ne doit pas être inférieur à 10 mm. On procédera éventuellement au rebouchage des cavités pour avoir une bonne planéité.

➤ **Mise en place des tissus de fibres continues**

Le renfort est mis en place par moulage (stratification) au contact, (méthode manuelle) - **figure III-1**. En premier lieu, il faut découper les bandes de tissus FRP aux dimensions voulues avec une paire de ciseaux ou un cutter en prenant toujours soin à considérer une sur longueur, généralement prise supérieure à 10 cm [JBDPA).1999], après cela on applique la résine sur l'élément à renforcer et on colle le tissu, finalement on sature avec la résine et on chasse les bulles d'air avec le rouleau ébulleur, ces deux dernières étapes seront répétées autant de fois que de nombre de couches. Pour le renforcement des poteaux, deux types de configurations de confinement peuvent être envisagés [JBDPA).1999] :

- Un confinement discontinu, réalisé avec des bandes en spirales continues ou en anneaux espacés sur toute la hauteur du poteau, et peuvent éventuellement être inclinés.
- Un confinement continu, avec des bandes non espacées réalisées sur toute la hauteur du poteau. **(Figure III-2).**



*Figure III. 12: Poteau confiné a) Confinement discontinu
b) Confinement continu
[(KHERKHACHE S).2013]*

➤ **La cure**

La durée de polymérisation de la résine est tributaire de la température ambiante, ainsi lors de travaux à l'extérieur, une cure s'avère nécessaire pour éviter que sable et poussière n'adhèrent à la résine encore fraîche.

➤ **Finition**

Une fois la résine durcie, les finitions telles que peinture ou enrobage par mortier peuvent être effectués.

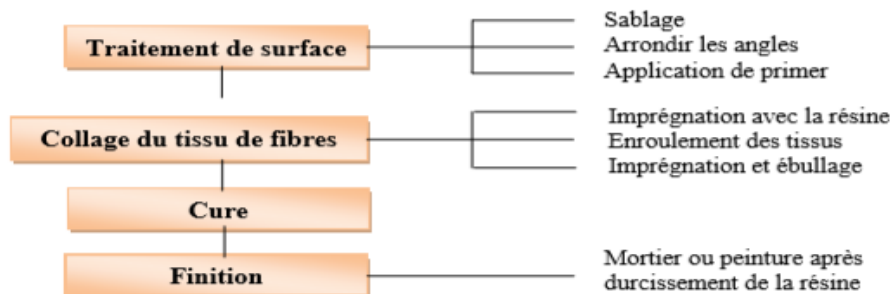


Figure III.13: Etapes de mise en œuvre du renfort textile a fibres continues. [(JBDPA).1999], [(Fukuyama et al).2000].

Tableau III.10: Avantages et inconvénients de Stratification au contact. [(Haffaressas A, Hami B).2016].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilité d'adaptation avec les différentes formes de colonnes. - Facilité de manutention et de mise en œuvre sur chantier sans le besoin d'équipements spéciaux. 	<ul style="list-style-type: none"> - Un bas niveau de contrôle de la qualité. - Demande beaucoup de main d'œuvre par rapport aux autres techniques.

III.2.2. Enroulement filamentaire

Le principe de l'enroulement filamentaire est semblable à celui de la stratification directe, sauf que la technique de l'enroulement filamentaire utilise la fibre continue au lieu des tissus afin que l'enroulement des filaments puisse être traité automatiquement au moyen d'une machine contrôlée par ordinateur. Une telle technique permet la précision de l'épaisseur du FRP, l'orientation de la fibre et le control de la fraction du volume ce qui mène à une meilleure performance. Cette technique a été initiée par **Fardis et Khalili (1981)**.

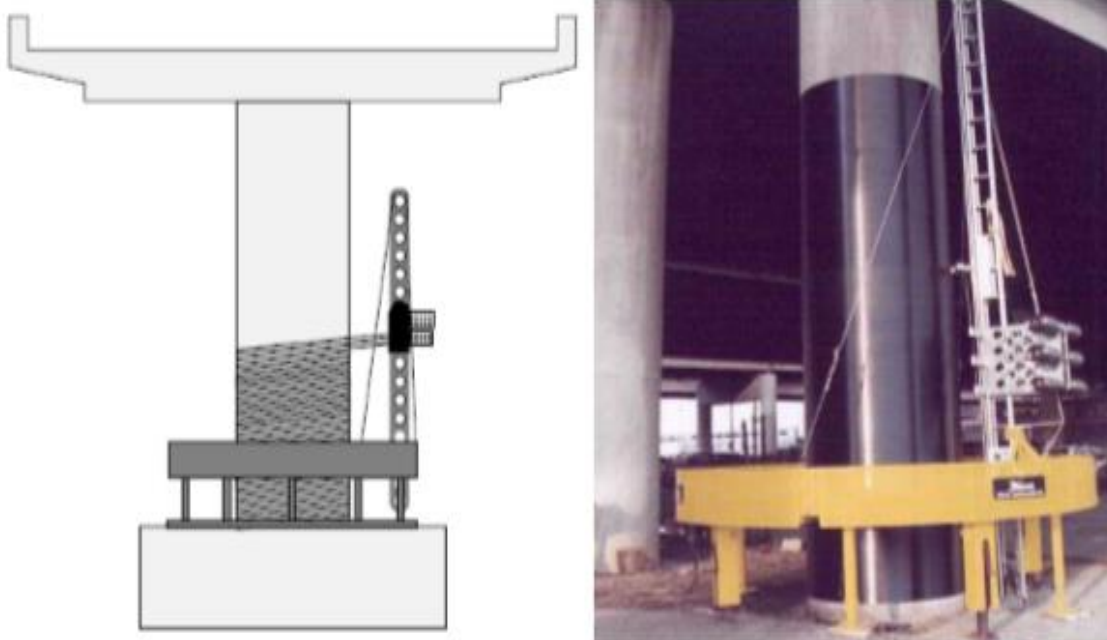


Figure III.14: Confinement des poteaux par enroulement filamentaire. [(Ould El Hacem, Z).2016]

Tableau III.11: Avantages et inconvénients d'Enroulement filamentaire [(Haffaressas A, Hami B).2016].

Avantages	Inconvénients
-Un contrôle amélioré de la qualité. -Une main d'œuvre réduite sur chantier.	-Moins de flexibilité d'adaptation avec les différentes formes de colonnes. -Exige un équipement spécial.

III.2.3. Chemisage par coquille préfabriquée en « FRP »

Les colonnes et poteaux en B.A peuvent aussi être renforcés en utilisant des chemises en FRP sous forme de coquilles préfabriquées [(Teng et al).2002]. Les coquilles sont fabriquées sous conditions contrôlées en utilisant la fibre en voile ou bondes avec l'imprégnation de résine effectuée avant l'installation.

Elles peuvent être fabriquées en demi cercles ou demi rectangles selon la forme du poteau à confiner [(Nanni,Norris).1995], [(Ohno et al).1997], ou encore des cylindres avec une fente verticale [Xiao,Ma).1997]. Pour un confinement efficace, un contact total entre la colonne et la coquille en FRP est essentiel.

Cela peut être assuré soit en liant la coquille à la colonne par adhésives ou en injectant un coulis ou mortier de ciment dans l'espace entre la coquille et la colonne. (Voir figure III-5)

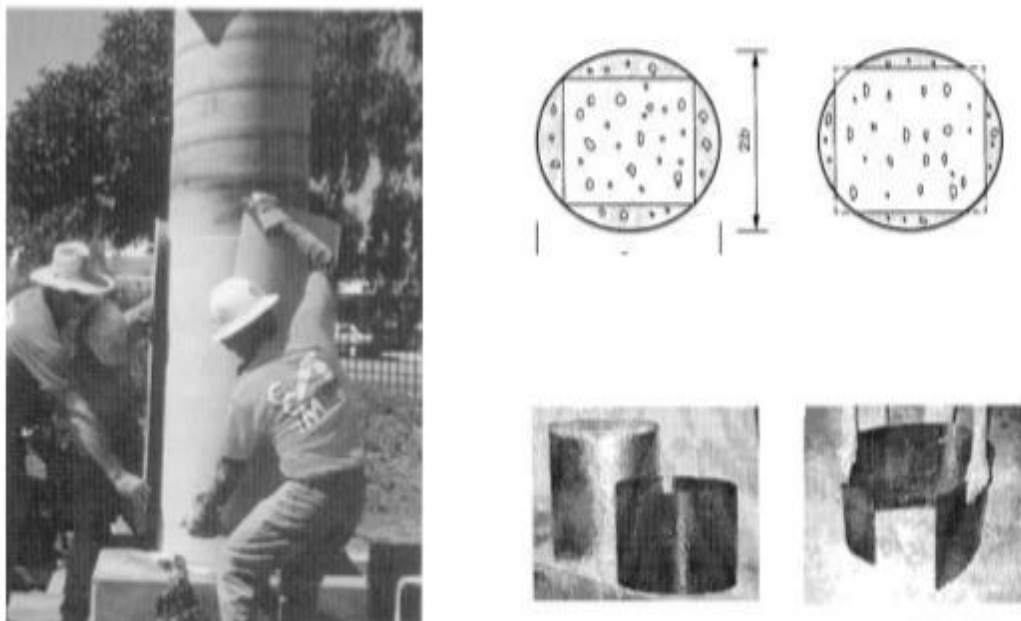


Figure III.15: Chemisage par coque en FRP [Monti 2003], [Teng et al 2002]

Tableau III.12: Avantages et Inconvénients de Chemisage par coquille préfabriquée en « FRP » [(Haffaressas A, HamiB).2016].

Avantages	Inconvénients
-Meilleur contrôle de la qualité. -Une main d'œuvre réduite sur chantier. -Utile pour modification de la forme des colonnes.	-Flexibilité d'adaptation limitée avec les différentes formes de colonnes. -Le coût de la préfabrication

III.2.4. Comparaison des méthodes de renforcement

Chacune des trois méthodes discutées au-dessus à ses avantages et ses inconvénients (Tableau III.4).

Tableau III.13: Comparaison entre les méthodes de mise en œuvre [Teng et al 2002]

Méthode	Avantages	Inconvénients
Stratification au contact	-Mise en œuvre facile, ne nécessite pas d'équipements spéciaux. -Bonne flexibilité ; peut être réalisée pour des poteaux de différentes formes de section	-La qualité du stratifié est moins bonne. -Nécessite le plus de travaux sur site
Enroulement filamenteux	-Améliore la qualité -Réduit les travaux sur site	-Flexibilité réduite -Nécessite des équipements spéciaux
Coques préfabriquées	-Meilleure qualité -Nécessite le minimum de travaux sur site. -Utilisable pour changer la forme de la section du poteau	-Flexibilité limitée -Coûts de la préfabrication

III.3. Le comportement mécanique des poteaux confinés

Lorsqu'une colonne confinée avec des matériaux composites FRP est soumise à une compression axiale, le béton s'étend latéralement et cette expansion sera confinée par l'enveloppe de FRP.

L'action de confinement exercée par le composite FRP sur les colonnes de section circulaire est illustrée sur la Figure III.6.

Pour les sections circulaires, le béton est soumis à un confinement uniforme, et la pression maximale de confinement fournie par le FRP est en rapport direct avec l'épaisseur et la résistance du FRP ainsi que le diamètre de la section du béton confiné. Cette pression de confinement se calcule pour les sections circulaires par la formule suivante :

$$f_l = \frac{2\varepsilon_{prf}t_{prf}}{d} = \frac{f_{prf}\rho_{prf}}{2} \quad (III.1)$$

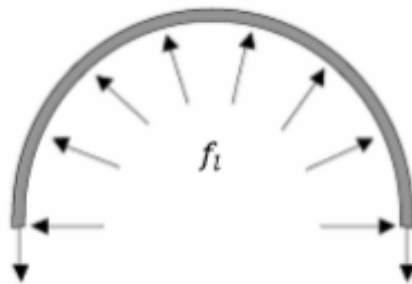


Figure III.16: Action du confinement d'un composite FRP [(Ould El Hacem, Z).2016]

Où f_l est la pression de confinement latérale due au FRP, f_{prf} la résistance à la traction du composite FRP (égale à $E_{prf} \cdot \varepsilon_{prf}$), t_{prf} l'épaisseur totale du FRP, d le diamètre de la section du béton, E_{prf} le module d'élasticité du composite FRP, ε_{prf} la déformation ultime de traction du composite FRP et ρ_{prf} le rapport volumétrique du FRP donné par l'équation suivante (pour une colonne entièrement enveloppée par FRP :

$$\rho_{prf} = \frac{\pi d t_{prf}}{\pi d^2 / 4} = \frac{4 t_{prf}}{d} \quad (\text{III.2})$$

Dans le cadre de recherches expérimentales qui a pour but le développement de cette nouvelle technique de confinement du béton, des résultats ont apporté une révélation prometteuse quant à l'efficacité d'utilisation de ce procédé. Ainsi grâce à la conjugaison des performances mécaniques des composites et celles du béton on a pu constater, de façon très nette, une amélioration significative de la résistance et de la ductilité dans le comportement des structures dans le Génie Civil. La plupart de ces recherches sur le confinement du béton se sont inspirées du modèle de **Richart et al.** Ce modèle a été développé pour des cylindres soumis à une pression hydrostatique avec une valeur de $K1 = 4,1$, ces chercheurs ont remarqué que la résistance en compression du béton confiné f_{cc} augmentait en fonction de la pression appliquée. Pour cela, ils ont proposé le modèle suivant : [(**Richart et al.**).1928]

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_1 \quad (\text{III.3})$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left(1 + k_2 \frac{f_{cc}}{f_{co}} \right) \quad (\text{III.4})$$

$$k_2 = 5k_1 \quad (\text{III.5})$$

k_1 étant le coefficient d'efficacité du confinement. Plusieurs chercheurs ont proposé des valeurs ou des formules empiriques pour le calcul du coefficient d'efficacité. Commenant par [(**Richart et al.**).1928] qui ont proposé une valeur de $K1 = 4,1$; [(**ssatcioglu et al.**).1992] ont proposé que $K1$ est l'inverse du coefficient de poisson ; [(**Samaan et al.**).1998] a proposé la formule suivante pour le calcul de k_1 :

$$k_1 = 6f_1^{-0,3} \quad (\text{III.6})$$

[(**Koksal**).2006] a proposé la formule suivante :

$$k_1 = \left(4.07 \frac{f_l}{f_c} - 0.89 \left(\frac{f_l}{f_c} \right)^2 + 0.807 \right) f_c \quad (\text{III.7})$$

D'autres chercheurs ont recommandé des expressions pour le calcul de la résistance à la compression des éléments en béton confiné par FRP : [(**Mander et al.**).1988]

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f_{co}} - 2 \frac{f_l}{f_{co}}} - 1.254 \quad (III.8)$$

[(Banzaid et al).2010] a proposé le modèle suivant :

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 1.6 \frac{f_l}{f_{co}} \quad (III.9)$$

Pour valider ce modèle ils ont étudié une série de 30 éprouvettes (16×32) de différentes résistances à la compression : (26, 50 et 62 MPa) renforcées par 1 et 3 couches de CFRP. Ils ont constaté une augmentation significative de la résistance et de la ductilité.

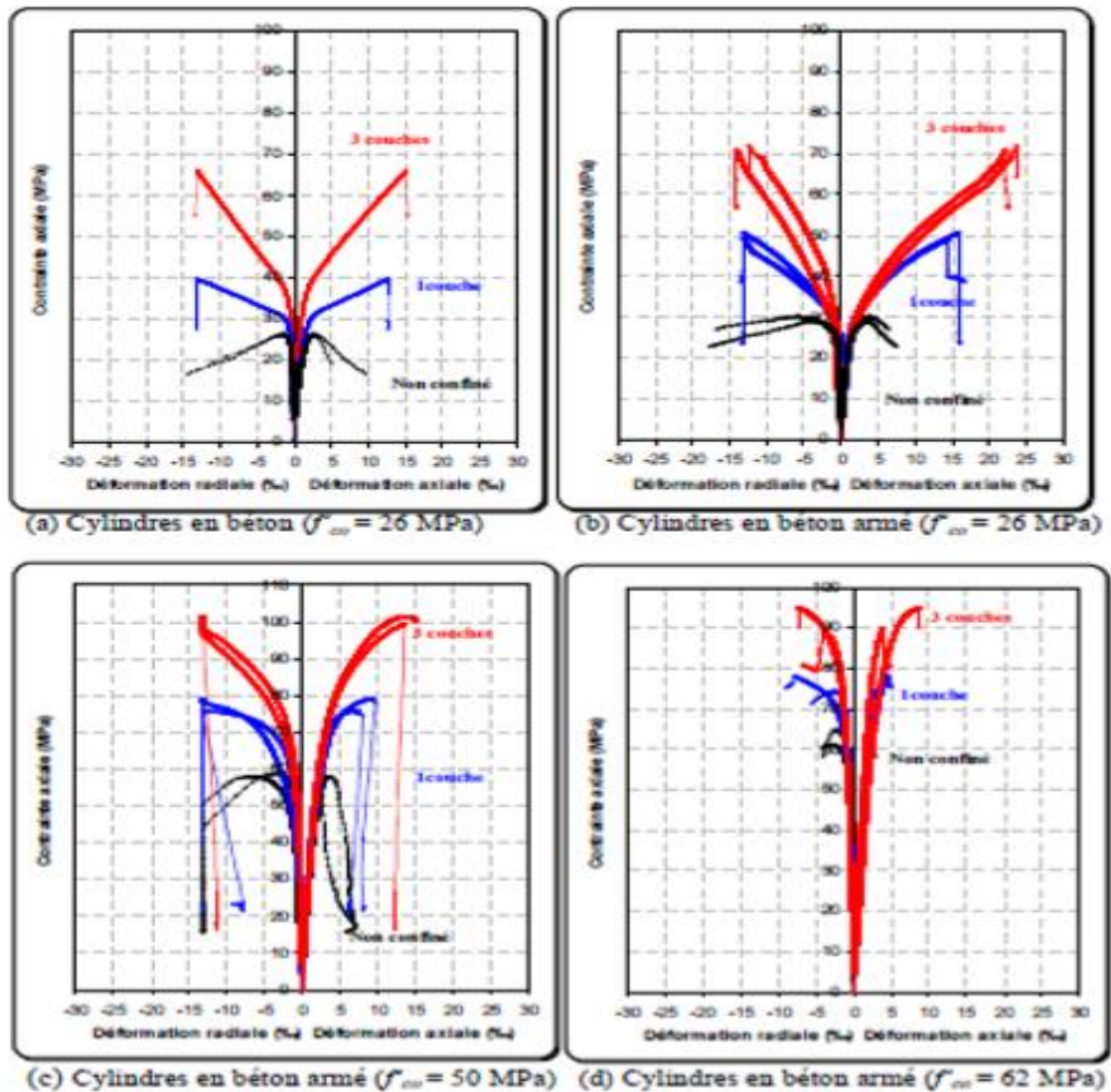


Figure III.17: Courbes contrainte-déformation [Benzaid 2010].

III.4. Contrainte - déformation du béton confiné avec matériaux composites

Les modèles de contrainte – déformation du béton avec matériaux composites sont les suivants :

III.4.1. Modèle de [(Fardis, Khalili).1982]

Ils ont proposé le 1er modèle contrainte-déformation pour le béton confiné avec des matériaux composites ‘FRP’, qui est un modèle hyperbolique pour décrire la résistance en compression du béton confiné, ils suggèrent que :

$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + \varepsilon_c \left(\frac{E_{cc0}}{f'_{cc}} - \frac{1}{\varepsilon_{cc}} \right)} \quad \text{(III.10)}$$

Et la déformation axiale correspondante ε_{cc} est donnée par l'équation :

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{cc0} + 0.001 \frac{E_{prf} t_{prf}}{d f'_{cc0}} \quad \text{(III.11)}$$

III.4.2. Modèle de [(Saadatmanesh et al).1994]

Ils ont proposé leur modèle à partir des modèles de [(Mander et al).1988] pour le béton confiné avec de l'acier. Ce modèle est basé sur une équation proposée par [(Popovics).1973], cette dernière estime la contrainte axiale du béton confiné comme suit :

$$\sigma_c = \frac{f'_{cc} x^r}{r - 1 + x^r} \quad \text{(III.12)}$$

Avec :

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad \text{(III.13)}$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad \text{(III.14)}$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad \text{(III.15)}$$

La déformation axiale du béton confiné ε_{cc} qui correspond à (contrainte au pic du diagramme contrainte-déformation du béton confiné) est donnée par la relation :

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} \right)^{-1} \quad (III.16)$$

III.4.3. Modèle de [(Miyachi et al).1999]

Ils ont proposé les équations suivantes pour tracer le diagramme contrainte-déformation d'un béton confiné avec des matériaux composites 'FRP' :

- Cas des courbes bilinéaires ascendantes :

$$\sigma_c = f'_{co} \left(2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right); 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t \quad (III.17)$$

$$\sigma_c = f'_{cu} - \lambda(\varepsilon_{cu} - \varepsilon_c); \varepsilon_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \quad (III.18)$$

Ou : $\varepsilon_t = \varepsilon_{co} - \lambda \frac{\varepsilon_{co}^2}{2f'_{co}}$ qui représente la déformation axiale dans la zone de transition

$$\lambda = \frac{1}{\varepsilon_{co}^2} \left(-2f'_{co}(\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}) + \sqrt{4f'_{co}(f'_{co}\varepsilon_{cu}^2 - 2f'_{co}\varepsilon_{cu} + f'_{cu}\varepsilon_{co}^2)} \right) \quad (III.19)$$

Dans ce cas : $f'_{cu} = f'_{cc}$;

$$\text{Et : } \varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left(1.0 + (15.87 - 0.093f'_{co}) \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.246 + 0.0064f'_{co}} \right) \quad (III.20)$$

Cas des courbes bilinéaires descendantes :

$$\sigma_c = f'_{co} \left(2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right); 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{co} \quad (III.21)$$

$$\sigma_c = f'_{co} + (\varepsilon_c - \varepsilon_{co}) \frac{(f'_{cu} - f'_{co})}{(\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co})}; \text{pour } \varepsilon_{co} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \quad (III.22)$$

III.4.4. Modèle de [Lam et Teng).2003]

Ils se sont basés sur l'effet des différents types de fibres sur la déformation axiale ultime du béton confiné avec des matériaux composites 'FRP', ils ont relié la déformation axiale ultime du béton confiné avec des matériaux composites 'FRP' à la pression de confinement comme suit:

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} = 2k_2 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (III.23)$$

Lam et Teng ont proposé un modèle contrainte-déformation simple basé sur les hypothèses suivantes :

- La 1ère branche du diagramme contrainte-déformation est parabolique.
- La 2ème branche du diagramme contrainte-déformation est linéaire.
- La transition entre les deux branches se fait progressivement.
- Le prolongement de la 2ème branche linéaire croise l'axe des contraintes à la valeur de la résistance en compression du béton non confiné.

La 2ème branche se termine lorsque la résistance et la déformation ultimes sont atteintes simultanément.

A partir de ces hypothèses, ils ont établi leur modèle pour les bétons confinés avec des matériaux composites 'FRP' comme suit :

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_{co}} \varepsilon_c^2; \text{ pour } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t \quad (III.24)$$

Et

$$\sigma_c = f'_{co} + E_2 \varepsilon_c; \text{ pour } \varepsilon_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc} \quad (III.25)$$

Ces équations donnent une courbe contrainte-déformation bilinéaire ascendante illustré cidessous avec une 1ère branche parabolique et une 2ème branche linéaire, la transition entre ces deux branches est progressive au point et tel que :

$$\varepsilon_t = \frac{2f'_{co}}{E_c - E_2} \quad (III.26)$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_{co}}{\varepsilon_{cc}} \text{ la pente de la 2ème branche linéaire .}$$

En remplaçant la valeur de $(f'_{cc} - f'_{co})$ à partir de l'équation $\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2 \frac{f_l}{f'_{co}}$

E_2 se simplifie à :

$$E_2 = \frac{2f_l}{\varepsilon_{cc}} \quad (III.27)$$

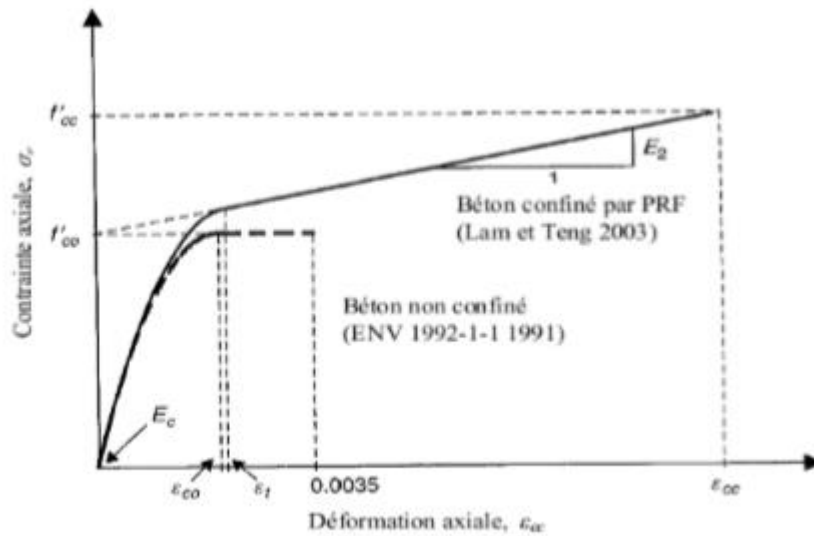


Figure III.18: Modèle σ - ε (déformation on fonction de contrainte) de Lam et Teng pour le béton confiné par FRP [(Teng et al).2002].

Lam et Teng ont proposé deux équations pour calculer la déformation axiale ultime (qui correspond à la valeur au pic de la relation contrainte-déformation) du béton confiné avec des matériaux composites respectivement de type 'CFRP' et de type 'GFRP'. Ce modèle est le premier modèle pour le béton confiné avec des matériaux composites qui tient compte du type des fibres du composite utilisé pour le confinement. À cet effet les auteurs proposent :

Pour le béton confiné avec des 'GFRP' :

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 15 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (III.28)$$

Pour les tubes en 'GFRP' remplis de béton :

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1.75 + 22 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (III.29)$$

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous pouvons retenir que parmi les techniques envisagées, L'application des matériaux composites est une alternative intéressante par rapport aux méthodes traditionnelles de réhabilitation. Une de ces méthodes consiste à améliorer le comportement mécanique des colonnes en béton armé par l'application d'un confinement réalisé par l'enroulement et le collage externe d'une enveloppe en matériaux composites.

Les matériaux composites ont une grande flexibilité en s'adaptant aux formes géométriques les plus complexes des éléments renforcés, facilités de manutention, de transport et de mise en œuvre sur site ainsi que leurs résistances assez importantes que les autres moyens de renforcement.

Après avoir examiné le comportement mécanique des poteaux confinés, nous constatons une augmentation significative de la résistance et de la ductilité. Nous concluons que Le confinement des poteaux en béton armé améliore la capacité en résistance et la ductilité. Il augmente considérablement le poids des éléments chemisés ce qui nécessite généralement le redimensionnement des fondations.

On a entamé plusieurs méthodes de confinement et des différents modèles de Contrainte - Déformation du béton confiné avec matériaux composites.

Chapitre IV

*Mécanisme de confinement en
FRP des sections circulaires*

IV.1. Introduction

Plusieurs recherches expérimentales ont été réalisées sur des éprouvettes du béton confiné par de FRP avec une section circulaire et qui sont soumises à des charges axiales de compression. Ces travaux ont conduit à l'élaboration de plusieurs guides à propos de confinement par matériaux composites FRP.

Le confinement des colonnes en béton par matériaux en polymère renforcé de fibres (FRP) améliore leurs performances. Le présent travail est consacré à l'étude du comportement de colonnes à petite échelle en béton confinées en FRP soumises sous charge de compression axiale, dans le but d'examiner l'effet de plusieurs paramètres sur l'efficacité de confinement des colonnes en béton de section circulaires par des enveloppes en FRP. Ces paramètres comprennent le degré de confinement, la résistance du béton (faible, normale et haute résistance), le type de matériaux composites (aramide, carbone, bore et verre), la forme de la section transversale des spécimens confinés (circulaire).

Les résultats ont démontré que les colonnes confinées par FRP amélioreraient significativement la performance des colonnes en termes de résistance et ductilité par rapport aux colonnes non confinées.

Les résultats indiquent que l'augmentation de la rigidité du confinement entraîne à la fois, une augmentation de la résistance à la compression et de la ductilité. Un modèle analytique de confinement est présenté pour prédire la résistance axiale maximale de confinement et la déformation correspondante des colonnes confinées en FRP. Ce modèle est basé sur la déformation circonférentielle à la rupture du composite FRP et la pression de confinement latérale effective de colonne confinée.

IV.2. Notions sur le confinement des sections circulaires par FRP

Le chargement axial d'une colonne circulaire confinée en FRP, génère une pression de confinement uniforme circonférentiel provenant de l'enveloppement (bandage) en FRP, qui résiste à l'expansion latérale (radial) de la colonne, ce qui induit un état de compression multiaxiale sur le noyau du spécimen, ainsi que l'amélioration simultanément de la capacité de déformation et de résistance dans la colonne circulaire. Le compactage du granulat de béton fournit initialement une réponse résistive élastique à la charge axiale, une fois la capacité du béton presque atteinte, le confinement du FRP est induit. Le confinement par l'enveloppe en FRP du noyau de béton est considéré comme passif (la pression de

confinement de l'enveloppe est induite et augmentée avec l'expansion du noyau de béton). Il est bien connu que, soumis à une compression axiale, le béton peut présenter une volumétrie linéaire ou une réduction pouvant atteindre 90% de la résistance maximale, ensuite, un durcissement non linéaire par expansion ou dilatation se produit jusqu'à la résistance maximale, le béton devient vulnérable, ce qui peut être annulé avec le confinement de FRP [(Coonan).2016].

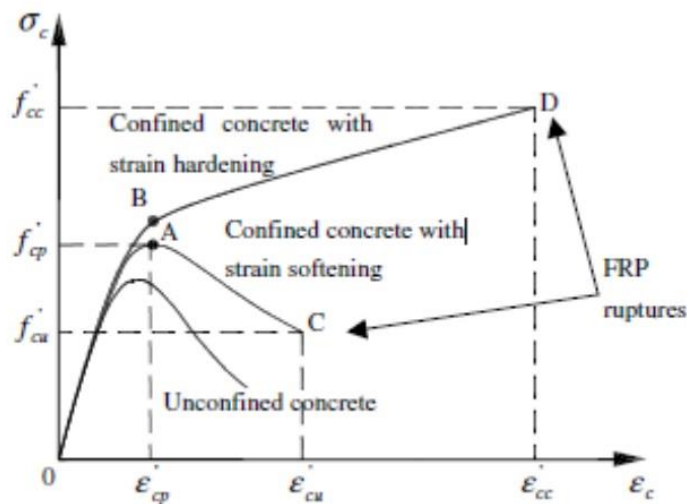


Figure IV.19: Réponse contrainte-déformation bilinéaire des colonnes circulaires.

Quand une colonne en béton de section circulaire est chargée en compression, le confinement de FRP, orienté dans le sens latéral du spécimen, affiche une réponse contrainte-déformation bilinéaire (**Figure IV.1**). La partie initiale de cette courbe suit celle du béton confiné car l'enveloppe en FRP a une influence minimale à ce stade. L'effet de l'enveloppe en FRP est double, comme il a été observé par [(Issa et karem).2004].

En premier lieu, il y a une augmentation de la résistance maximale de la colonne confinée par rapport au spécimen non confiné. Comme la contrainte axiale dans le béton augmente avec la dilatation latérale du noyau de béton, une diminution de la rigidité est évidente. En second lieu, dans la réponse contrainte-déformation après que le point de transition est atteint et que la pente de cette deuxième région dépend de la rigidité du FRP, avec une ductilité post-pic de la colonne confinée formant un plateau pseudo-ductile car le béton est retenu par l'enveloppe en FRP [(Coonan).2016].

IV.2.1. Notations des paramètres utilisés dans la section

Les spécimens répondant aux critères ci-dessus ont été utilisés pour évaluer la performance des modèles existants, et le développement de nouveaux modèles. La base de données comprenait pour chaque spécimen des détails suivants :

- Les dimensions de spécimen [hauteur (H), diamètre (D) et rapport (H/D)];
- Les propriétés du béton [résistance du béton non confiné (f_{co}) et déformation (ϵ_{co})];
- Les propriétés d'AFRP [module d'élasticité (E_f), résistance à la traction maximale d'AFRP (f_f) et épaisseur totale (t_f)].
- Les mesures ultimes du béton confiné [résistance axiale (f_{co}) et déformation axiale (ϵ_{cc}), la déformation de rupture du composite en AFRP ($\epsilon_{h.rup}$)].
- Les rapports de résistance et de déformation (f_{cc}/f_{co}) et ($\epsilon_{h.rup} / \epsilon_{co}$) respectivement.

IV.2.2. Pression de confinement ultime

La plupart des modèles de résistance et de déformation utilisent des paramètres communs qui affectent le confinement en matériaux composites de FRP ; tel que la pression de confinement ultime (f_l). L'action de confinement exercée par composites en FRP sur les colonnes de section circulaire est illustrée sur la figure 2. Pour les sections circulaires, le béton est soumis à un confinement uniforme, et la pression maximale de confinement fournie par le FRP est en rapport direct avec l'épaisseur et la résistance du FRP ainsi que le diamètre de la section du béton confiné [(Thériault et al).2000, (Teng et al).2003, (Lam et teng).2003]. Sur la base du mécanisme du confinement en FRP illustré dans la figure 2, la pression de confinement ultime (f_l) est exprimée par l'expression suivante [(Sadeghian et Fam).2015].

$$f_l = \frac{2E_f \epsilon_{h.rup} t_f}{D} = \frac{2f_f t_f}{D} \tag{IV.1}$$

Où : f_f est la résistance à la traction du FRP, E_f est le module d'élasticité en traction du FRP, t_f est l'épaisseur totale de l'enveloppe en FRP, $\epsilon_{h.rup}$ est la déformation de rupture de composite et D est le diamètre du noyau de béton.

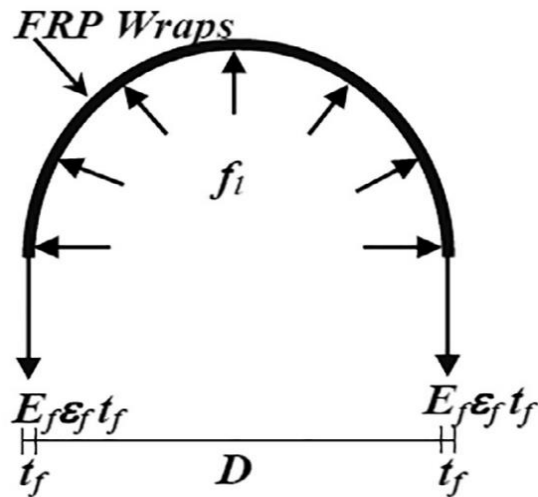


Figure IV.20: Mécanisme de confinement du béton confiné au FRP.

IV.2.3. Rigidité de confinement

Selon la littérature, plusieurs chercheurs ont découvert que l'introduction de la rigidité de confinement de l'enveloppement (K_l) dans les modèles de confinement est très importante ; cela permet d'atteindre une très grande valeur de ductilité. Où, K_l est exprimé comme suit [(Ozbakkaloglu et Lim).2013].

$$K_l = \frac{2E_f t_f}{D} \quad (IV.2)$$

IV.2.4. Modèle proposé pour le travail

Le modèle développé, pour prédire la résistance ultime des colonnes circulaires confinées avec AFRP, est donnée par l'expression suivante [(Djafar-Henni et Kassoul).2018].

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 1.2 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{1.25} \left(\frac{K_l}{f_{co}} \right)^{0.37} \quad (IV.3)$$

La relation proposée est une fonction de puissance, avec différentes constantes calibrées avec précision. Ce modèle montre qu'en absence du confinement :

$$f_{cc} = f_{co} \quad (IV.4)$$

Pour prédire la déformation ultime des colonnes circulaires confinées avec AFRP, est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 2.3 + 1.2 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0.75} \left(\frac{\varepsilon_{h.rup}}{\varepsilon_{co}} \right)^{1.25} \quad (IV.5)$$

IV.3. Développement d'une nouvelle loi de comportement

IV.3.1. Forme générale de la nouvelle courbe

Le développement de la nouvelle loi contrainte – déformation est basé sur la modification des paramètres définissant le comportement bilinéaire des colonnes confinées par des enveloppes de polymères renforcés de fibres d'aramide, tout en conservant l'équation de [(Richard et Abbott).1975]. Pour rappel, cette loi est exprimée par la formule suivante :

$$f_c = \frac{(E_1 - E_2) \varepsilon_c}{\left[1 + \left(\frac{(E_1 - E_2) \varepsilon_c}{f_o} \right)^{n_t} \right]^{\frac{1}{n_t}}} + E_2 \varepsilon_c \quad (IV.6)$$

IV.3.2. Hypothèses de développement

Les hypothèses de base de cette nouvelle loi sont fondées sur les différentes observations évoquées précédemment comme suit :

- La courbe contrainte-déformation possède une réponse bilinéaire ascendante du béton confiné en AFRP, comme indiqué dans la figure (3).
- La pente de la première droite (E_1) est la même que celle du béton non confiné.
- La pente de la deuxième droite (E_2) est affectée par le degré de présence des enveloppes en AFRP.
- La ligne de la première partie rencontre la seconde partie linéaire légèrement dans la zone de transition (n_t).
- La deuxième pente intercepte l'axe des forces avec la force de référence plastique (f_o).
- L'extrémité de deuxième partie est atteinte au point de la coordonnée de la résistance ultime et la déformation correspondante.

IV.3.3. Expression de la nouvelle loi contrainte-déformation

La loi de contrainte-déformation monotone de [(Wu et al).2009] applicable aux sections circulaires des colonnes courtes confinées par polymères renforcés en AFRP est utilisé ici

pour la nouvelle proposition. Cette loi consiste en une courbe bilinéaire composée en deux parties de lignes intersectées par une zone de transition. Les hypothèses discutées précédemment pour la proposition de la nouvelle loi sont conformes aux observations de testes du béton en FRP avec augmentation monotone de la relation contrainte-déformation. Ainsi, les paramètres affectants ont été calibrés par analyse de régression en utilisant la base de données sélectionnée pour les colonnes circulaires courtes en béton confiné en AFRP.

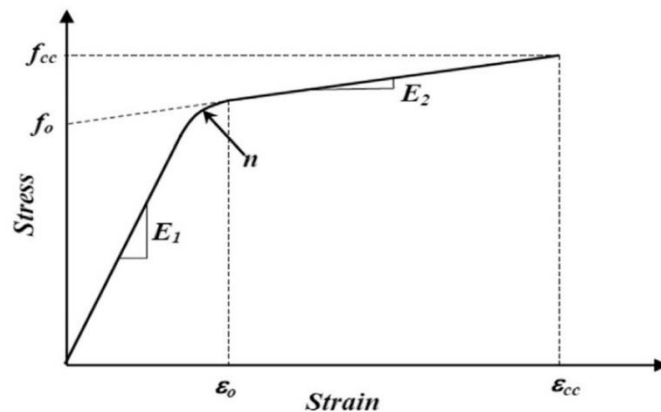


Figure IV.21: Courbe contrainte-déformation pour le comportement du béton confiné en FRP

➤ **Première pente (E₁)**

Le module de rigidité tangentielle initiale de la courbe est le même module élastique du béton non confiné estimé par l'ACI 363-84, déterminé par l'équation suivante :

$$E_1 = 3320\sqrt{f_{co}} + 6900 \quad (IV.7)$$

➤ **Paramètre de transition n_t**

En considérant que la loi n'est pas très sensible au paramètre de forme (n_t), qui contrôle principalement la courbure dans la zone de transition de la courbe contrainte-déformation. Après un calibrage approximatif, une valeur constante a été choisie conforme à notre modèle fixé égale à :

$$n_t = 2.25 \quad (IV.8)$$

➤ **Pression plastique de transition f₀**

La pression plastique de transition (f₀) est l'intersection de la deuxième pente de la courbe contrainte-déformation avec l'axe de contrainte (f_{cc}). En utilisant d'autres données expérimentales que celles adoptées par (Wu et al, 2009), l'équation suivante a été réécrite de

nouveau en fonction de la rigidité de confinement (K_l), les deux pentes de la courbe (E_1, E_2), les propriétés du béton non confiné (f_{co}, ε_{cc}) ainsi que la déformation de rupture du composite en AFRP ($\varepsilon_{h.rup}$). Après plusieurs essais d'étalonnage, une nouvelle proposition (f_o) est proposée comme suit :

$$f_o = 0.872 f_{co} + 0.371 f_l + 0.75 \frac{K_l}{f_{co}} (E_1 - E_2)^{-0.05 \frac{\varepsilon_{co}}{\varepsilon_{h.rup}}} \quad (IV.9)$$

➤ **Deuxième pente (E_2)**

La deuxième pente de la couche ascendante a été calibrée, en modifiant celle adoptée par (Wu et al, 2009), cette formule est estimée par l'expression suivante :

$$E_2 = \frac{f_{cc} - f_{co}}{\varepsilon_{cc}} + 1.725 K_l \quad (IV.10)$$

IV.4. Présentation du modèle proposé

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

Pour cela, une colonne en béton de section circulaire endommagée réparée par un confinement par polymères renforcés en AFRP. Est analysée. Le modèle analysé est formé de 4 types de spécimens différents (spécimen 1 de $f_{co} = 20$ MPa ; spécimen 2 de $f_{co} = 30$ MPa ; spécimen 3 de $f_{co} = 40$ MPa ; spécimen 4 de $f_{co} = 50$ MPa) et en gardant le diamètre $D = 152.5$ mm et la hauteur $H = 305$ mm pour tous les spécimens.

Tableau IV.14: Propriétés géométriques et mécaniques des matériaux.

Matériaux	Module d'élasticité (MPa)	La déformation
Béton	$E_{(béton)} = 30000$	$\varepsilon_{co} = 0.0024$
Plaque de renforcement	$E_{(aramide)} = 118200$	$\varepsilon_{h.rup} = 0.00145$
	$E_{(CFRP)} = 140000$	
	$E_{(GFRP)} = 70000$	
	$E_{(Bore)} = 430000$	

La figure (IV.4) représente la validation du modèle en comparant les résultats de contrainte-déformation monotone de [(Wu et al).2009]. On remarque que le modèle proposé donne une résistance mieux que le modèle de [(Wu et al).2009], ça revient à la résistance ultime des colonnes circulaires confiné proposé par [(Djafar-Henni et Kassoul).2018].

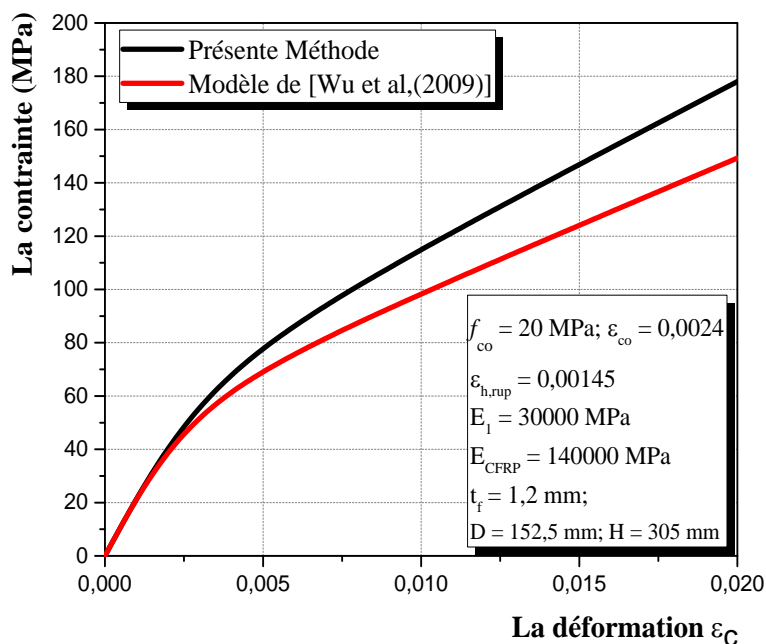
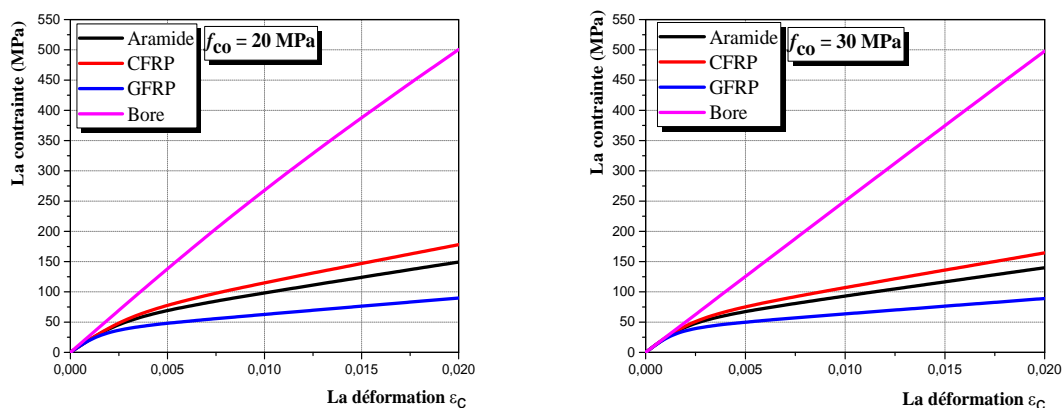


Figure IV. 22: Validation du modèle proposé en comparant avec le modèle de [(Wu et al).2009]

IV.5. Résultats et discussions

IV.5.1. Effet de la rigidité de la plaque de renforcement



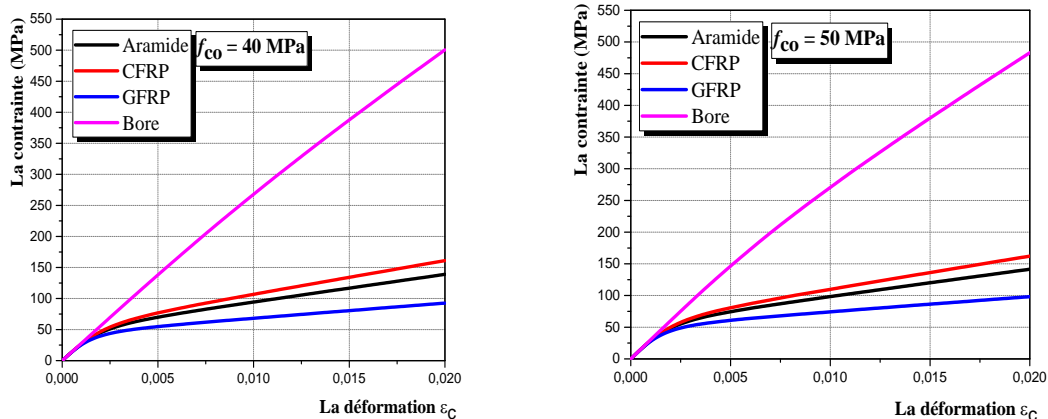


Figure IV. 5: Effet de la rigidité de composite sur le poteau confiné.

Tableau IV.2. Effet de la rigidité de composite sur le poteau confiné.

		La contrainte f_c (MPa)			
		$f_{co} = 20 \text{ Mpa}$	$f_{co} = 30 \text{ Mpa}$	$f_{co} = 40 \text{ Mpa}$	$f_{co} = 50 \text{ Mpa}$
CFRP	0	0	0	0	0
	0,01	114.87	107.04	106.78	109.78
	0,02	178.02	164.43	161.15	162.24
GFRP	0	0	0	0	0
	0,01	62.741	63.583	68.185	74.301
	0,02	89.857	88.979	92.658	98.207
Aramide	0	0	0	0	0
	0,01	98.258	93.063	94.350	98.371
	0,02	149.32	139.90	138.93	141.52
Bore	0	0	0	0	0
	0,01	267.88	250.40	267.88	270.48
	0,02	500.49	497.90	500.49	483.08

L'influence de la rigidité de la plaque est présentée sur la figure (IV.5) et le tableau (IV.2) pour les différents poteaux confinés étudiés ($f_{co} = 20 \text{ MPA}$, $f_{co} = 30 \text{ MPA}$, $f_{co} = 40 \text{ MPA}$ et $f_{co} = 50 \text{ MPA}$).

On constate que, le poteau confiné est devenu plus résistant si on utilise un composite de caractéristique mécanique élevée quel que soit la rigidité du poteau ($f_{co} = 20 \text{ MPA}$, $f_{co} = 30 \text{ MPA}$, $f_{co} = 40 \text{ MPA}$ et $f_{co} = 50 \text{ MPA}$). C'est-à-dire, le type de composite utilisé montre l'efficacité et la rigidité du poteau confiné.

IV.5.2. Effet de l'épaisseur de la plaque t_f :

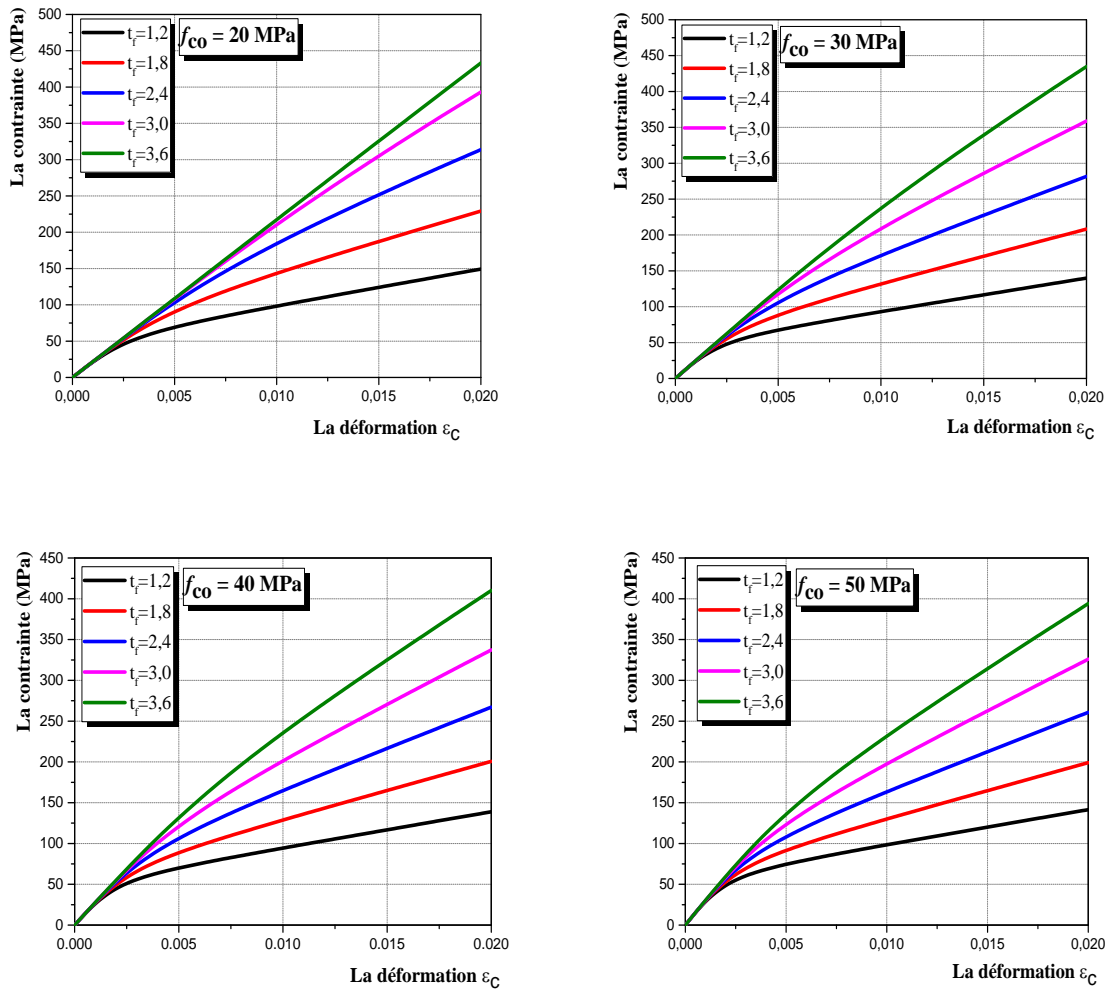


Figure IV.6: Effet de l'épaisseur de la plaque t_f .

L'influence de l'épaisseur de la plaque t_f est présentée sur la figure (IV.6) et le tableau (IV.3) pour les différents poteaux confinés étudiés ($f_{co} = 20$ MPa, $f_{co} = 30$ MPa, $f_{co} = 40$ MPa et $f_{co} = 50$ MPa).

On constate que, le poteau confiné est devenu plus résistant si on utilise un composite à caractéristique mécanique élevée quel que soit l'épaisseur du poteau ($t_f = 1.2$ mm, $t_f = 1.8$ mm, $t_f = 2.4$ mm, $t_f = 3$ mm et $t_f = 3.6$ mm). C'est-à-dire, le type de composite utilisé montre l'efficacité de l'augmentation de l'épaisseur du poteau confiné.

Tableau IV.3. Effet de l'épaisseur de la plaque t_f sur le poteau confiné.

t_f (mm)	Déformation (ϵ_c)	La contrainte f_c (MPa)			
		$f_{co} = 20$ Mpa	$f_{co} = 30$ Mpa	$f_{co} = 40$ Mpa	$f_{co} = 50$ Mpa
1.2	0	0	0	0	0
	0,01	98.258	93.063	94.350	98.371
	0,02	149.32	139.90	138.93	141.52
1.8	0	0	0	0	0
	0,01	143.29	131.63	128.71	129.95
	0,02	229.26	208.24	200.74	199.13
2.4	0	0	0	0	0
	0,01	184.24	171.23	164.73	163.21
	0,02	313.87	281.76	267.17	260.83
3	0	0	0	0	0
	0,01	210.30	208.60	201.14	197.44
	0,02	393.11	358.84	337.35	326.02
3.6	0	0	0	0	0
	0,01	217.28	237.02	235.41	231.46
	0,02	433.26	434.82	410.11	394.08

IV.5.3. Effet de diamètre de spécimen D : en gardant $H = 305$ mm.

L'influence de diamètre de spécimen D est présentées sur la figure (IV.7) et le tableau (IV.4) pour les différents poteaux confinés étudiés ($f_{co} = 20$ MPA, $f_{co} = 30$ MPA, $f_{co} = 40$ MPA et $f_{co} = 50$ MPA). On constate que, plus qu'on augmente le diamètre ($D = 76.25$ mm, $D = 152.5$ mm, $D = 228.75$ mm, $D = 305$ mm) le poteau confiné est devenu moins résistant. C'est-à-dire, le type de composite utilisé montre qu'il y a une relation inverse entre la contrainte et le diamètre, lorsque le diamètre diminue la force axiale augmente.

Tableau IV.4. Effet de diamètre de spécimen D sur le poteau confiné.

D (mm)	Déformation (ϵ_c)	La contrainte f_c (MPa)			
		$f_{co} = 20$ Mpa	$f_{co} = 30$ Mpa	$f_{co} = 40$ Mpa	$f_{co} = 50$ Mpa
76.25	0	0	0	0	0
	0,01	184.24	171.23	164.73	163.21
	0,02	313.87	281.77	267.17	260.83
152.5	0	0	0	0	0
	0,01	98.258	93.063	94.350	98.371
	0,02	149.32	139.90	138.93	141.52
228.75	0	0	0	0	0
	0,01	69.043	68.794	72.840	78.566
	0,02	100.24	97.902	100.84	105.84
305	0	0	0	0	0
	0,01	55.073	57.252	62.552	69.117
	0,02	77.299	78.186	82.793	88.952

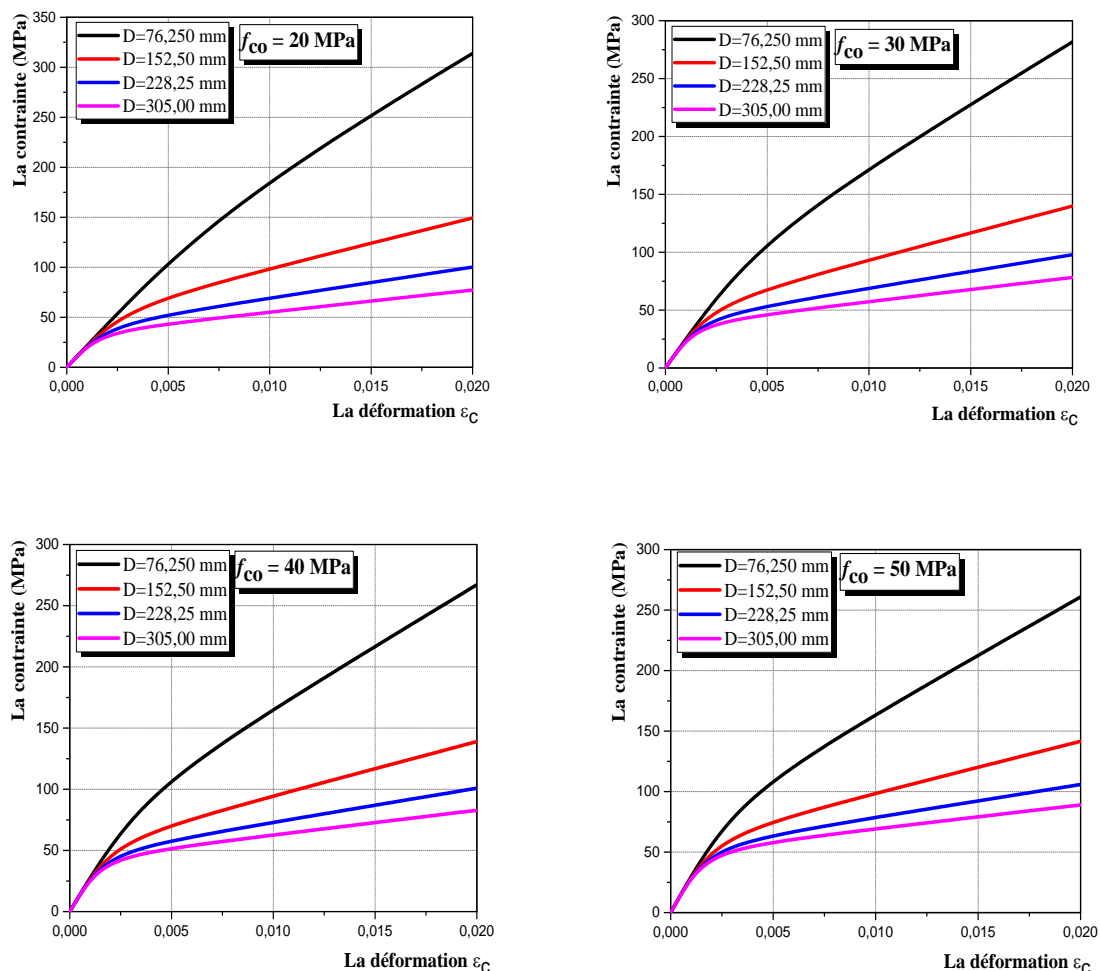


Figure IV.7: Effet de diamètre de spécimen D .

IV.6. Conclusion

Le but de ce chapitre est de prédire un modèle de contrainte-déformation approprié pour le béton confiné par des différents enveloppements en FRP.

L'optimisation mathématique, à l'aide des algorithmes génétiques, des paramètres de confinement avec des bandes en FRP, a permis de mettre en évidence l'influence des paramètres considérés dans cette étude dans l'évolution des résistances ultimes des cylindres en béton confinés.

L'optimisation de la fonction qui décrit la résistance du cylindre confiné est conduite dans le but de trouver la meilleure combinaison de variables qui donnerait une valeur cible du gain en résistance.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées à partir la discussion des résultats de cette étude:

En augmentant la résistance et changeant les effets (Effet de la rigidité de la plaque de renforcement, Effet de l'épaisseur de la plaque t_f et effet de diamètre de spécimen D) dans chaque étape on déduit que :

- Les fibres de bore ont toujours des meilleures propriétés que celles d'aramide, CFRP et de GFRP.
- A mesure que l'épaisseur des plaques augmente, la contrainte augmente, c'est-à-dire, un poteau résistant.
- Il y a une relation inverse entre la contrainte et le diamètre. Lorsque le diamètre diminue la force axiale augmente

Conclusion générale

Conclusion générale

Le contexte général du présent travail représente une contribution à l'étude de la réhabilitation, par confinement avec matériaux composites, des structures endommagées en béton.

Dans ce travail l'intérêt s'est porté sur le confinement des colonnes en béton renforcées par des matériaux composite, pour tenter de voir son effet sur la résistance et la ductilité, ainsi que la reprise d'effort, dans le cas où l'on connaît le degré d'endommagement de la structure ou simplement dans le cas où l'on vise un certain gain en résistance.

Afin de mettre en évidence les effets du confinement par des plaques renforcées à base de différents fibres " carbone, verre, aramide, bore" sur le comportement du béton, une campagne expérimentale a été menée. Des spécimens cylindriques en béton ont été confinés par des plaques renforcées et soumis à des tests de compression axiale.

Ce travail concerne l'étude du comportement axial résultant de l'effet du confinement externe procuré par une enveloppe en matériaux composites à base de différentes fibres (AFRP, CFRP, GFRP, Bore). Pour l'ensemble des spécimens testé, une étude paramétrique sera faite pour voir leur influence sur le comportement des poteaux confiné.

Les paramètres suivants ont été considérés : la rigidité et l'épaisseur de plaque et le diamètre de spécimen. Ces essais ont permis de tracer la variation de la contrainte en fonction de la déformation axiale selon les différentes configurations considérées.

L'analyse des résultats obtenus montre clairement que :

Les fibres de bore ont toujours des meilleures propriétés que celles d'aramide, CFRP et de GFRP.

A mesure que l'épaisseur des plaques augmente, la contrainte augmente, c'est-à-dire, un poteau résistant.

La hauteur n'a aucun effet sur la force axiale.

Il y a une relation inverse entre la contrainte et le diamètre. Lorsque le diamètre diminue la force axiale augmente

Enfin, malgré la bonne concordance entre les résultats expérimentaux et théoriques et notre travail a révélé une nette amélioration de la résistance à la compression du béton confiné. Le confinement des colonnes renforcées en utilisant des matériaux composites demeure un sujet

d'intérêt notamment au point de vue des méthodes de calcul et de dimensionnement, mode de rupture et ancrage, de même qu'au point de vue de l'évaluation de leur durabilité en service.

Perspectives :

Afin de mieux comprendre le comportement du béton confiné avec des plaques de renforcement en FRP et soumis à la compression axiale, il serait intéressant dans les recherches futures de :

- Conduire des essais sur des colonnes ainsi confinées à l'échelle réelle ;
- Utiliser un autre modèle de confinement
- Conforter les résultats de l'optimisation mathématique par des essais en confinant des cylindres présentant différents taux d'endommagement.
- Conduire des essais avec des nombres de plis différents de la plaque de FRP ;
- Tenir compte de la variation de la résistance du béton non confiné, en menant une campagne d'essais sur des spécimens confinés présentant différentes classes de résistance initiale ;
- Tenir compte de l'orientation des fibres
- Confirmer, par des essais, les résultats de l'approche théorique qui met en évidence l'effet de la précontrainte dans la plaque.

Référence bibliographique

[(**AGRAWAL B.D., BROUTMAN L.J.**).1990], Analysis and performance of fiber composite,. 2nd edition, John Wiley and Sons, New York, p.449.

[(**Ahmed Touati**).2018], Le renforcement des structures de génie civil par matériaux composites, GB. Treasurer chez IACES - International Association Of Civil Engineering Students.

[(**Ait Ameer Meziane.M.**).2008], Modélisation du décollement des structures hybrides Composite-Béton, *Université Djillali Liabes de Sidi Belabbes*, p.25-26-27.

[(**Amjad Kreit**).2012], Réparation des ouvrages en béton armé par les matériaux composites en utilisant la technique NSM, École doctorale Mécanique, énergétique, génie civil et procédés Toulouse, INSA, p.40.

[(**Banzaid et al**).2010], Performances des colonnes en béton confiné avec des enveloppes externes en composites PRFC, Université de Jijel. BP. 98 Ouled Issa, Jijel - 18000, Algérie, p20.

[(**Belhannachi H**).2009], Réhabilitation et renforcement des poteaux en béton armé, Université Mentouri, Constantine Faculté des Sciences de L'Ingénieur Département de Génie Civil, p.22-26-30-35.

[(**Benarbia Dj**).2018], Etude du comportement mécanique des poutres fissurées et renforcées par des matériaux composites, UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID-TLEMCEN, p.36.

[(**Berthelot J**). 2012], Matériaux composites, Comportement mécanique et analyse des structures, 1999 - complements.lavoisier.net.

[(**Boulaziz.A**).2014], Analyse des contraintes d'interfaces dans les poutres en béton armé renforcées par des stratifiés en fibre de carbone : Effet de fluage, Colloque International, CMMS Tizi Ouzou, Algérie, p.12-13 .

[(**C.A.R.M.A**).2004], Glossaire des Matériaux Composites, C.A.R.M.A, Actualisation décembre 2004, pp2-3, p.32.

[(**Calgaro J, Lacroix R**). 1997], Maintenance et réparation des ponts, Presse de l'école Nationale des Ponts et Chaussées, p.92.

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

[(**Deghmane Y, Riou O**).2018], Modélisation des contraintes de cisaillement et normale dans les poutres endommagées en béton armé réparé par composite en nid d'abeille, UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET, p.3-4.

[(**Djafar-HennietKassoul**).2018], Stress-strain model of confined concrete with Aramid FRP wraps, journal Construction and Building Materials, 2018.

[(**DORLOT J.M, BAILLON J.P, MASOUNAVE J**).1986], Des matériaux 2ème édition, Ecole polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, p.467.

[(**Fardis,Khalili**).1982], FRP-encased concrete as a structural material, Magazine of Concrete Research, Vol. 34, No. 121, pp. 191-202.

[(**FardisetKhalili** ,1981)], Concrete encased in fiber glass-reinforced plastic, ACI Material Journal Proceedings, Vol. 78, No. 6, pp. 440-446.

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

[(**Frédérique Vergne**),2010], Les matériaux composites en réponse à des besoins concrets dans le bâtiment, LE MONITEUR, 26-03.

[(**Fukuyama et al**).2000], Social capital and civil society, site web books.google.com, 2000.

[(**Godar B**). 1997], La réparation du béton dégradé, Maintenance et réparation des ponts, Presse de l'école Nationale des Ponts et Chaussées, p88.

[(**Haffaressas A, Hami B**).2016], Recherche bibliographique sur le renforcement des poteaux par matériaux composites, université 8 Mai 1945 Guelma, 2016-06.

[(**Hamelin p**).2002], AFGC recommendations concerning strengthening and repairing of Concrete structures with composite materials, AFGC/RILEM. Seminar on advances in Materials and structures, Bagneux, France.

[(**HAMELIN P, VARASTEHPOUR H**).1995], Les poutres en béton armé mettant en œuvre des matériaux composites, Journal de la mécanique industrielle et des matériaux, Vol. 48(2), Paris.

[(**Issaetkarem**).2004], Compressive strength of concrete cylinders with variable widths CFRP wraps, Proc., 4th International Conf. On Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, ACMBS-IV, Calgary, Alberta, Canada.

[(**J.V. MIRANDA**).2004], techniques et systèmes de renfort des structures en béton, Chamonix, France, pp.151-157.

[(**Kherkhache S**). 2013], Contribution à l'étude des matériaux composites pour Le confinement externe des colonnes en béton, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum-El-Bouaghi, p.7-12.

[(**Koksal**).2006], stress-strain model for compressive fracture of RC columns confined with CFRP jackets, site web, www.researchgate.net, 2006.

[(**L'Hermite R**). 1967], L'application des colles et résines dans la construction. Le béton à coffrage portant, Annales de l'ITBTP, 239.

[(**Lam etteng**).2003], Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete, Construction and Building Materials, Vol. 17, pp. 471-489.

[(**Llanoos J**). 1992], La maintenance des ponts routiers, Approche économique, Presse de l'école Nationale des Ponts et Chaussées.

[(**Mander et al**).1988], Theoretical stress-strain model for confined concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE.

[(**Meir U**). 1995], Strengthening of structures using carbon fiber-epoxy composites, Construction and Buildig Materiels, Vol 9 (6), 341-351.

[(**Miyauchi et al**).1999], Pathophysiology of endothelin in the cardiovascular system, Annual review of physiology , 99 .

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

[(**Nanni,Norris**).1995], «FRP» jacketed concrete under flexure and combined flexure-compression, Construction and Building Materials, Vol. 9, No. 5, pp.273-281.

[(**Ndzana A**).2007], Réhabilitation des ouvrages en béton arme dégradés par la corrosion des armatures, Université de douala (école normale supérieure de l'enseignement technique) ENSET-DIPT2. Diplôme des professeurs des lycées d'enseignement technique 2eme grade.

[(NEZAR RAMZI).2018], Renforcement des poutres en béton armé par polymères renforcés des fibres (PRF) en flexion simple, UNIVERSITE L'ARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI, p.14-15-16.

[(Ohno et al).1997], Bond properties of CFRP plate joint, Non-Metallic («FRP») Reinforcement for Concrete Structure, Proceedings of the Third International Symposium, Sapporo, Japan, pp. 241-248.

[(Ould El Hacem, Z).2016], Renforcement du béton par les matériaux composites, Université de Tébessa, p17-21.

[(Oz bakkalogluet Lim).2013], Compressive behavior of concrete-filled FRP tube columns: 22 Assessment of critical column parameters, Engineering Structures, 51, 188-199.

[(Perrier R, et al) .1996], Ouvrages d'art utilisant des matériaux composites, IREX, (6),8.

[(Popovics).1973], A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete, Cement and concrete research, 73.

[(Resse C, Venaut M). 1981], Projection des mortiers béton et plâtres, Techniques et applications bâtiment et TP, p.10.

[(Richard et Abbott).1975], Versatile elastic-plastic stress-strain formula, Journal of the Engineering Mechanics, 75.

[(Richart et al).1928], A study of the failure of concrete under combined compressive stresses, site web ideals.illinois.edu.

[(Saadatmanesh et al).1994], Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps, ACI STRUCTURAL JOURNAL, TECHNICAL PAPER, Title no. 91-S43.

[(Sadeghianet Fam).2015], Improved Design-Oriented Confinement Models for FRP-Wrapped Concrete Cylinders based on Statistical Analyses, Engineering Structures, 87, 162-182.

[(Samaan et al).1998], Effect of column parameters on FRP-confined concrete, Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol. 2, No. 4, pp. 175-185.

[(Teng et al).2002], Strength models for FRP-confined concrete, Journal of Structural Engineering.

[(**Theillout J.N**). 1997], Le Projet de renforcement ou de réparation des ponts en béton, Presse de l'Ecole Nationales des Ponts et Chaussées, 425-459.

[(**Thériault et al**).2000], Gestion de la rémunération: théorie et pratique, S St-Onge - 2000 - G. Morin.

[(**Venuat M**). 1989], La pratique des ciments mortier et béton, Moniteur technique, édition du moniteur, 89.

[(**Wu et al**).2009], Unified Strength Model Based on Hoek-Brown Failure Criterion for Circular and Square Concrete Columns Confined by FRP, Journal of Composites for Construction, 14(2), p. 175–84.

[(**Yahiaoui S**).2006], Etude expérimentale de la durabilité des éléments fissurés en béton armé rigidifiés par les matériaux composites, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES, p. 21-37-38.

[(**JBDPA**).1999], Seismic Retrofitting Design and Construction Guidelines for Existing RC Buildings with FRP Materials, Japan Building Disaster Prevention Association.

[(**Lam et Teng**).2002], Strength models for FRP-confined concrete, Journal of Structural Engineering 2002.

[(**Monti 2003**)], Seismic upgrade of reinforced concrete columns with FRP, Technical report, Teheran, 22 July 2003, p29.

[(**Site web/1**)], http://www.zpag.net/Tecnologies_Industrielles/Matieres_Plastiques.htm,.

[(**ssatcioglu et al**).1992], STRENGTH AND DUCTILITY OF CONFINED CONCRETE, Journal of Structural engineering 1992.

[(**Xiao, Ma**).1997], Compressive behavior of concrete confined by various types of FRP composite jackets, journal of Reinforced Plastic and Composite, 97.