



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

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

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Présenté par :

Merzoug Soumia

Mansour Khadidja

Sujet du mémoire

**Collage structural des matériaux composites pour le renforcement
des structures de génie civil : Analyse et dimensionnement**

Soutenu publiquement le 30/06/2020 Devant le jury composé de :

Prof.	Bouakaz Khaled	Président
Prof.	Tahar Hassaine Daouadji	Rapporteur
Dr.	Zidour Mohamed	Examineur
Dr.	Bensattalah Tayeb	Examineur

Promotion : 2019 /2020

Remerciements

*Tout d'abord, nous voulons remercier Dieu, le compatissant,
le miséricordieux*

Donner la santé et le courage de faire cet humble travail.

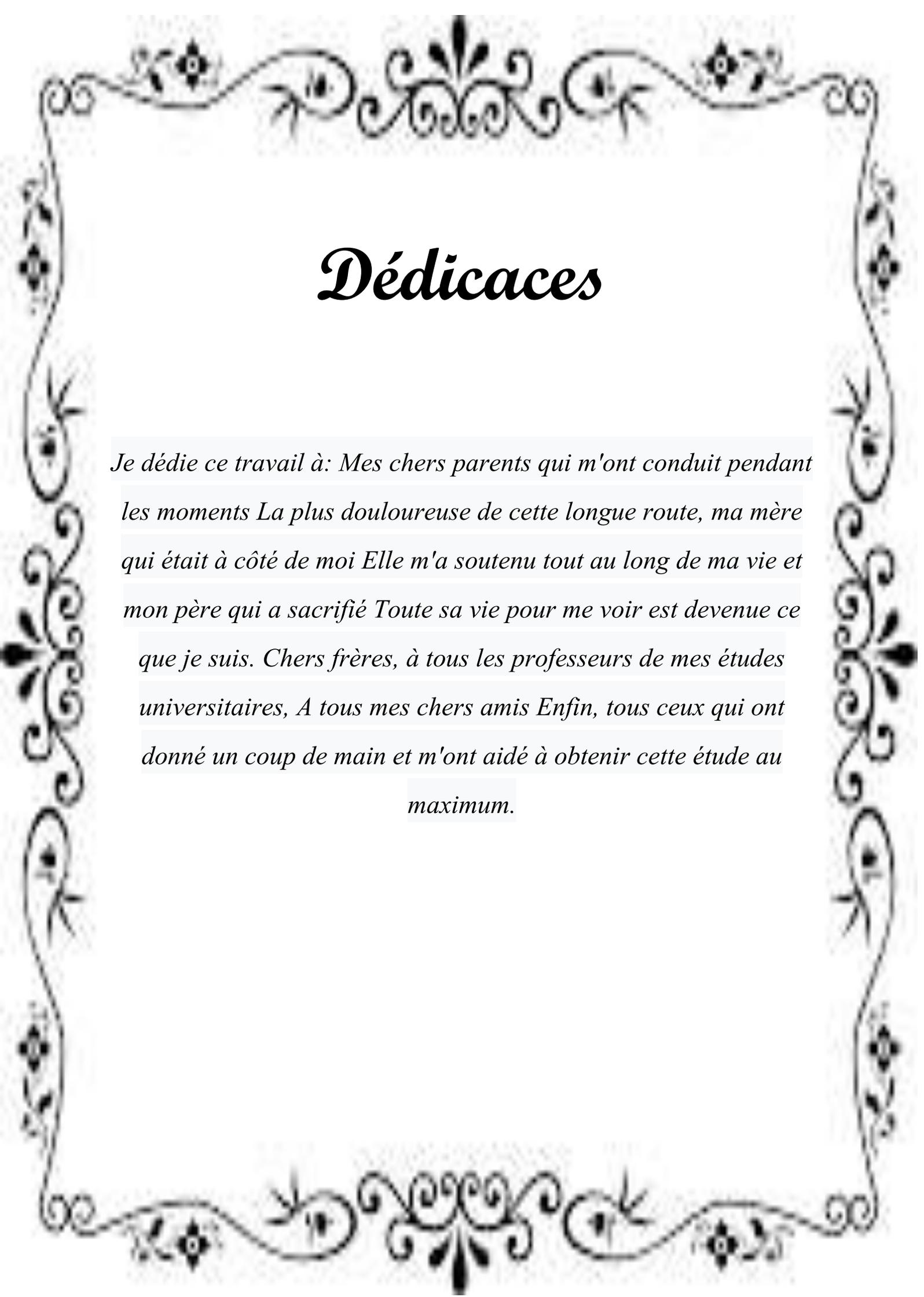
*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements au
superviseur du Prof Hassaine Daouadji Tahar, pour son
aide pendant la supervision complète.*

*Un grand merci aux membres du jury pour leur intérêt
apporté à notre travail, que nous serons heureux
d'apprécier.*

*Nous remercions également nos parents qui nous ont
enseigné et nous ont enseigné.*

*Nos remerciements vont également à tous ceux qui ont,
directement ou indirectement*

*Aide et encouragement apportés. Qu'ils expriment ici notre
profonde gratitude .*

A decorative border with intricate floral and scrollwork patterns surrounds the text. The border is composed of repeating motifs of leaves, flowers, and swirling lines, creating a classic and elegant frame.

Dédicaces

Je dédie ce travail à: Mes chers parents qui m'ont conduit pendant les moments La plus douloureuse de cette longue route, ma mère qui était à côté de moi Elle m'a soutenu tout au long de ma vie et mon père qui a sacrifié Toute sa vie pour me voir est devenue ce que je suis. Chers frères, à tous les professeurs de mes études universitaires, A tous mes chers amis Enfin, tous ceux qui ont donné un coup de main et m'ont aidé à obtenir cette étude au maximum.

SOMMAIRE

Liste des figures	I
Liste des tableaux	V
Liste des notations	VI
Résume.....	VII
Abstract.....	VIII
Introduction générale.....	X

Chapitre 1

Pathologie des ouvrages en béton armé

1.1. Introduction	1
1.2. pathologie d'origine chimique	2
1.2.1. carbonation de béton	2
1.2.2. corrosion des armatures.....	3
1.2 .3. Reaction sulfatique	5
1.2.4. Attaque par les acides.....	5
1.3. Pathologies d'origine physique	6
1.3.1. Retrait.....	6
1.3.1.1. Retrait de dessiccation.....	7
1.3.1.2. Retrait Endogène	7
1.3.1.3. Retrait plastique.....	8
1.3.1.4. Retrait thermique	8
1.3.2. Cycle Gel-dégel.....	9
1.4. Pathologie d'origine mécanique	9
1.4.1. Les chocs	9
1.4.2. Fissuration d'origine mécanique	11
1.5. Conclusion.....	13

Chapitre 2

Techniques de renforcement/réparation des ouvrages en béton armé

2.1. Introduction	15
2.2. Les techniques de renforcement	15

2.2.1. Précontrainte additionnelle	16
2.2.2. projection de béton.1	17
2.2.3. Chemisage en béton armé	19
2.2.4. Tôles collées.	21
2.2.5. Traitement des fissures	22
2.2. 6. Renforcement par matériaux composites collés.....	24
2.2.7. Domaines d'application des composites dans le Génie Civil.....	31
2. 3. Conclusion	35

Chapitre 3

Généralité sur les matériaux composites

3.1. generalite sur les materiaux composite	37
3. 1.1. Introduction	37
3. 1.2. Revue des différents renforts disponibles	37
3.1.2.1. Les fibres de carbone	37
3.1.2.2 Les fibres de Kevlar	38
3.1.2.3. Les fibres de Verre	39
3.1.3. Notion sur Les matrices.....	40
3.1.3.1 Les matrices organiques	40
3.1.3.2 Résines thermodurcissables	40
3.1.3.3. Résines thermoplastiques	40
3.1.3.3.4. Les matrices métalliques	41
3.1.4 Problèmes liés à l'utilisation des matériaux composites dans le génie civil	41
3.1.4.1. Introduction	41
3.1.4.2 Résistance des matériaux composites	41
3.1.4. 3. Elasticité à différentes échelles	42
3.1.4.4. Adhésif	45
3.2. Présentation de la théorie des plaques stratifiées	45
3.2.1. Notation	46
3.2.2. Hypothèses de la théorie des stratifiés	47
3.2.3. Relation déformation – déplacement.....	48
3.2.4. Les contraintes.....	50
3.2.5. Les Forces par unité de longueur	52
3.2.6. Moments par unité de longueur.....	52

3.2.7. Relations constitutives du stratifié	52
3.2.8. Stratifiés symétriques	55
3. 3. Conclusion	57

Chapitre 4

Méthode de calcul de type Règlementaire aux ELU

4.1. Introduction	59
4.2. Comportement mécanique d'une section de poutre renforcée	59
4.3 Calcul de moment résistant ultime	62
4.3.1. Méthode FIB	62
4.3.1.1. Action composite parfaite	63
4.3.1.2. Perte d'action composite	64
4.3.2. Méthode AFGC	65

Chapitre 5

Analyse et dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée par composites

5.1. Introduction.....	69
5.2. Dimensionnement d'une poutre rectangulaire renforcée par une plaque en matériaux composites FRP.....	70
5.2.1. Conditions de compatibilités	70
5.2.2. Validation de la présente méthode	73
5.3. Elément en béton arme soumis à la flexion	80
5.3.1. Les poutres rectangulaires	80
5.3.2. la poutre en té	94
Conclusion.....	109
Références bibliographique.....	110

LISTE DES FIGURES

Figure.1.1. Processus général de la carbonatation.....2

Figure 1.2 :: présente les différentes étapes de dégradation due à la corrosion.3

Figure 1.3 :corrosion des armatures 4

Figure 1.4 :Comportement force-flèche (essai de flexion 3 points)5

Figure 1.5:Principaux types de retrait du béton 8

Figure 1.6 :Dégradation d'un ouvrage soumis au gel dégel.....9

Figure 1.7 :Choc sur une pile de pont.10

Figure 1.8 :Endommagement des ouvrages en béton armé10

Figure 1.9 :Endommagement (cas des les bâtiments)..... 11

Figure 1.10 :Pont à poutres..... 13

Figure 2.1: Différents types de réparation par précontrainte additionnelle..... 16

Figure 2.2 : Renforcement au moyen de béton projeté 17

Figure 2.3 :Projection par voie sèche 17

Figure 2.4 : Projection par voie humide 18

Figure 2.5 :: Renforcement de poutre par béton projeté..... 18

Figure 2.6 : Chemisage des poteaux en béton armé20

Figure 2.7 :Renforcement de poteaux circulaires et rectangulaires avec des chemises en acier
..... 21.

Figure2.8 Application de plats métalliques selon le procédé L'Hermitte (Hamelin 2002)...
..... 21

Figure2.9 : Tôles collées: (a) difficulté de manutention ; (b) Renforcement du viaduc de
Terrenoire partôles collées perforées). 22

Figure 2.10:Les différents traitements des fissures23

Figure 2.11 : Technique de Calfeutement. 23

Figure 2.12:Conception du système multicouche 25

Figure 2.13: Procédé de mise en œuvre des matériaux composites26

Figure 2.14 . Réparation à la flexion d'une poutre par matériaux composites.....26

Figure2.15:Les différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques en
composites 27

Figure 2.16: Renforcement d'une dalle (deux directions 27

Figure 2.17 : Confinement de colonnes..... 29

Figure2.18: Chemisage par coquille préfabriquée en «PRF» (Monti 2003)	30
Figure2.19: Mise en place des lamelles sur une poutre.....	32
Figure2.20: Mise en place d'équerres de renforcement sur une poutre en Té	32
Figure 2.21: Mise en place de lamelles de carbone autour d'un poteau	32
Figure2.22: Mise en place des lamelles sur un mur en briques.....	33
Figure 2.23: Mise en place des lamelles sur une structure bois.....	33
Figure2.24: Mise en place des lamelles sur une coupole	34
Figure 2.25: Mise en place des tissus de carbone sur des voûtes	34
Figure2.26: Mise en place des lamelles sur des ovoïdes en béton armé Val-de-Marne.....	35
Figure3.1 : relation contrainte déformation en traction pour les différents composants.	42
Figure 3.2: Illustration d'un renfort fibreux unidirectionnel.....	43
Figure3.3: Modes de rupture des matériaux composites a) rupture de la fibre, b) rupture de de la matrice, c) rupture de l'interface fibre – matrice.....	45
Figure 3.4 : composite stratifié.....	46
Figure3. 5 : Les coordonnées d'un stratifié101	46
Figure3.6 : Plan médium dans un stratifié déformé	48
Figure3.7 : Forces par unité de longueur.....	50
Figure3.8: Moments par unité de longueur.	52
Figure3.9 : Couches symétriques.	55
Figure 4.1 : Phases de comportement d'une poutre en béton armé.....	59
Figure4.2: Différents types de décollement observés sur des éléments en BA renforcés par le collage d'une composite sur la face tendue.....	60
Figure4.3 : Différents modes de rupture des poutres Renforcées par les composites.....	61
Figure 4.4 : Décollement du renfort.....	62
Figure4.5: Section transversale d'une poutre en béton armé en flexion simple	63
Figure 4.6: Diagramme des trois pivots	65
Figure 5.1 Section rectangulaire d'une poutre en béton armé renforcée par composites: géométrie, diagramme de distribution des déformations, des contraintes et des force	71
Figure 5 .2: Effet de la contrainte limite d'élasticité de l'acier sur le dimensionnement de la section d'une plaque en composite CFRP pour une poutre rectangulaire en béton armé non endommagée.....	75
Figure5.3: Effet de la déformation unitaire du béton sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé non endommagée en flexion renforcée par une plaque en composite CFRP	76

Figure 5.4: Effet de la fraction volumétrique des fibres sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque en composite	76
Figure 5.5: Effet du taux de renforcement d'armature sur le dimensionnement d'une poutre rectangulaire en béton armé renforcée par CFRP.....	77
Figure 5.6: Effet de la variation de la température sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion des plaques en matériaux composite	78
Figure 5.7: Effet de la variation d'humidité sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque en composite CFRP	78
Figure 5.8: Effet de la variation du rapport h/b sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par une plaque en composite CFRP	79
Figure 5.9: Effet de variation de l'enrobage sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par une plaque en matériaux composite CFRP	79
Figure 5.10 : Setion rectangulaire d'une poutre en béton armé sans armature comprimée renforcée par composites: géométrie, diagramme de distribution des déformations, des contraintes et des forces	80
Figure 5 .11: Effet de la résistance du béton sur le dimensionnement d'une poutre rectangulaire en béton armé sans armatures comprimées renforcée par CFRP	85
Figure 5.12: Effet de la contrainte limite d'élasticité de l'acier sur le dimensionnement de la section du composite pour une poutre rectangulaire en béton armé sans armatures comprimées.....	85
Figure 5.13 : Effet de la déformation unitaire du béton sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé sans armatures comprimées en flexion renforcée par CFRP	86
Figure 5.14 : Effet du taux de renforcement sur le dimensionnement d'une poutre rectangulaire en béton armé sans armatures comprimées renforcée par CFRP	87
Figure 5.15: Section rectangulaire avec armatures comprimées renforcée par CFRP : géométrie, diagramme de distribution des déformations, des contraintes et des forces.....	87
Figure5.16 : Effet de la résistance caractéristique du béton sur le dimensionnement d'une poutre rectangulaire renforcée en flexion par CFRP	92
Figure 5.17 : Effet de la déformation unitaire du béton sur le dimensionnement d'une poutre rectangulaire avec armature comprimée en flexion renforcée par CFRP.....	93
Figure 5.18 : Effet de la contrainte limite d'élasticité de l'acier sur le dimensionnement de la section du composite pour une poutre rectangulaire en béton armé sans armatures comprimées.....	93
Figure 5.19 : Effet du taux de renforcement sur le dimensionnement d'une poutre rectangulaire en béton armé renforcée par CFRP	94
Figure 5.20: Géométrie d'une section en T d'une poutre en béton armée renforcée en flexion par composites CFRP	95
Figure 5.21 : Analyse d'une section en T en béton armé renforcée en composite CFRP	95

Figure 5.22 : Effet de la résistance caractéristique du béton sur le dimensionnement d'une poutre en T en béton renforcée en flexion par une plaque en composite CFRP..... 100

Figure 5.23 : Effet de la contrainte limite d'élasticité de l'acier sur le dimensionnement de la section du composite CFRP pour une poutre en T en béton armé 101

Figure 5.24 : Effet de la déformation unitaire du béton sur le dimensionnement d'une poutre en T en béton armé renforcée par composite CFRP..... 104

Figure 5.25 : Effet du taux de renforcement sur le dimensionnement d'une poutre en T en béton armé renforcée par CFRP 102

Figure 5.26 : Section rectangulaire avec armatures comprimées, double renforcée par CFRP 103

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Une comparaison des différentes méthodes de renforcement des colonnes..
.....30

Tableau 3.1 Propriétés des fibres de carbone..... 38

Tableau3.2 : Propriétés des fibres de Kevlar 39

Tableau3.3 : Propriétés des fibres de Verre 39

Tableau3.4 : Propriétés des Résines thermodurcissables 40

Tableau3.5 : Caractéristiques typiques de l'adhésif d'époxy (FIB bulletin 14, 2001..... 45

Tableau3.6 : Exemple des notations des stratifiés 47

Tableau5.1 : Caractéristiques et propriétés mécaniques des matériaux utilisées..... 73

Tableau5.2 : comparaison des résultats de la présente méthode et le modèle du Ashour 2002
..... 74

Tableau5.3 : Caractéristiques et propriétés mécaniques des matériaux utilisées..... 83

Tableau5.4 : Comparaison des résultats de la présente méthode modèle de Hayder..... 84

Tableau5.5 :Caractéristiques et propriétés mécaniques des matériaux utilisées..... 90

Tableau5.6 : Comparaison des résultats de la présente méthode avec les différents modèles
..... 91

Tableau5.7 :Caractéristiques et propriétés mécaniques des matériaux utilisées..... 98

Tableau 5.8 : Comparaison des résultats avec différents modèles de calcul..... 99

Tableau 5.9 : Caractéristiques et propriétés mécanique des matériaux utilisées.....100

LISTE DES NOTATIONS

Notations:

σ_{bc}	: Résistance caractéristique du béton.
ϵ_{bc}	: La déformation unitaire du béton.
σ_s	: Contrainte d'élasticité limite des armatures tendus.
σ'_s	: Contrainte d'élasticité limite des armatures de compression.
A_s	: Section des armatures tendus.
A'_s	: Section des armatures de compression.
A_{FRP}	: Section du composite.
σ_{FRP}	: Contrainte limite du composite.
E_f	: Module d'élasticité du composite.
ϵ_f	: Déformation du composite.
T_f	: Contribution du composite à l'effort tranchant.
S_f	: Espacement entre les bandes en composite.
M_u	: Capacité du moment de la section.
N_u	: La charge axiale
y	: La hauteur de l'axe neutre.
K_1 et K_2	: Paramètre caractérisant le béton.
l_0	: Longueur du poteau.
i	: Rayon de giration de la section géométrique.
λ	: L'élancement du poteau.
B	: La section du poteau.
f_{c28}	: La résistance caractéristique du béton.
f'_{cc}	: La résistance moyenne du béton confiné.
$f_{pu,d}$: La pression de confinement.

Abréviations:

FRP:	Fiber Reinforced Polymer.
ACI:	American Concrete Institute.
FIB :	Fédération Internationale du Béton.
AFGC :	Association Française de Génie Civil.
BAEL:	Béton Armé à Etat Limite.

Résumé:

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 ou ne Répondront 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 : le renforcement d'éléments structuraux par matériaux composites collés, mais les règles de dimensionnement concernant l'application de tels matériaux pour le renforcement n'ont pas encore toutes été clairement établies. Le présent travail se propose de contribuer à l'établissement de ces règles pour le renforcement des structures en béton armé par matériaux composites. Une étude analytique a donc été menée sur les différents éléments en béton armé (poutres, dalles et poteaux), qui ont ensuite été comparés par d'autres modèles analytiques.

Grâce à ces différentes études, les gains en termes d'énergie dissipée apportés par les différentes configurations de renforcement, les gains en termes de ductilité globale de la structure ainsi qu'en termes d'augmentation de la charge portante ont été vérifiés. Outre ces aspects quantitatifs, ce travail a permis de proposer des pistes pour l'établissement de règles de dimensionnement de ces renforts spécifiques à la réhabilitation des structures, en lien avec les normes actuelles (BAEL).

Pour cela plusieurs méthodes ont été établis pour le calcul de la section du composite qui dépend de différents paramètres qui influent sur le dimensionnement des éléments structurels renforcés : la géométrie de la section, les caractéristiques des matériaux utilisées.

Mots clés: Structures en béton armé, renforcement, réparation, matériaux composites (FRP).

Abstract:

One of the major problems in the field of construction is the degradation of Structures. Most of the structures show signs of weakness and no longer meet or will no longer meet the requirements for which they were designed. The causes are multiple, we can cite errors during the study or execution, an increase in loads, a change in the operation of the structure, corrosion of the reinforcements, accidental actions such as earthquakes or shocks. The appearance of these problems leads to the reinforcement of structural elements by bonded composite materials, but the design rules regarding the application of such reinforcement materials have not yet all been clearly established. The present work aims to contribute to the establishment of these rules for the reinforcement of reinforced concrete structures by composite materials. An analytical study was therefore carried out on the different reinforced concrete elements (beams, slabs and columns), has been undertaken, and compared with other analytical models.

The purpose of the study was to evaluate the effectiveness of the different strengthening configurations in increasing the dissipated energy and the ductility. In addition to the quantitative aspects, it was made possible to propose design rules for the use of FRP in structural rehabilitation, linked to current rules (BAEL).

There are many studies that have been established for the design of FRP area which depends on different strengthening configurations and influence on the design of reinforced structural elements: geometric of FRP area, characteristics of used material.

Keywords: concrete structural element, reinforced, repairing, Fiber Reinforced Polymer (FRP).

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale :

En 19^{ème} siècle la découverte du matériau béton crée une révolution dans le domaine du bâtiment avec le temps ce matériau devient indispensable. En outre à nos jours les ouvrages déjà construits en béton ont plusieurs types de dégradation (mécanique ; chimique...) et au fil du temps et par fois même devient non conforme aux exigences actuelles. À cet effet et à fin d'assurer le bon fonctionnement et la longévité de ces derniers ; il est impératif de trouver un moyen pour résoudre ces multiples problèmes à la fois efficace en terme de résistance ainsi qu'économique qui est le renforcement extérieur des éléments structuraux.

Dans les années précédentes, la technique la plus utilisée était le collage de plaques métalliques dans les parties les plus sollicitées. Cette technique résout le problème de dégradation des structures par augmentation de la capacité portante des éléments structuraux mais elle présente de sérieux inconvénients dont la corrosion des armatures, la difficulté de maniabilité et l'impossibilité d'ancrer les plaques sur des surfaces irrégulières... Récemment, des travaux de recherche ont été menés pour remplacer ces plaques d'acier par un matériau non corrosif, plus léger et de haute résistance, l'utilisation de plaques en matériaux composites augmente les performances des éléments renforcés ; comparativement aux autres techniques de renforcements

L'objectif du travail résumé dans le mémoire est de contribuer à développer des règles de dimensionnement des réparations par composites. L'étude porte sur le renforcement et la réparation des éléments en béton armé par collage externe des plaques en matériaux composites.

Par ailleurs, il s'agit d'obtenir quelques informations relatives à l'influence des différents paramètres: caractéristiques des matériaux (béton, acier et composite), géométrie de la section sur le dimensionnement des poutres renforcées.

Le présent manuscrit comporte cinq chapitres, qui sont structurés comme suit:

- Le premier chapitre on présentera une classification des désordres les Plus fréquemment observés et les différentes causes susceptibles de provoquer la Fissuration du béton en s'intéressant d'une part à l'influence d'une fissure sur les Processus de dégradation
- Le deuxième chapitre est consacré à présenter les différents techniques de réparation qui peuvent être envisagées pour la réhabilitation et le renforcement des structures en béton armé.

- Le troisième chapitre est consacré à un aperçu générale sur les matériaux composites et ses caractéristiques avantageux ainsi que leur utilisation dans le domaine de génie civil.
- Le quatrième chapitre est consacré à présenter des méthodes de calcul.
- Le cinquième chapitre Une étude analytique sur le dimensionnement des poutres en béton armé non endommagées renforcées et/ou réparées par collage des plaques en composites

Enfin, nous présentons dans la conclusion l'importance de la technique de réparation des ouvrages en béton armé.

CHAPITRE 1

PATHOLOGIE DES OUVRAGES

EN BETON ARME

1.1. Introduction

Le béton armé, matériau de construction par excellence, a bénéficié de nombreuses études et de multiples expérimentations. Son utilisation s'est démocratisée et il est aujourd'hui utilisé à grande échelle à travers le monde. La durabilité des ouvrages en béton armé, qui peut être définie comme étant leur capacité de reprendre les efforts qui leur sont appliqués tout au long de leur vie. Cette durabilité facilite ou améliore la vie des usagers, et assure également une économie considérable sur le long terme, car de tels ouvrages nécessiteront de réparations, qui peuvent être très élevés, et peuvent même dépasser les coûts initiaux de construction.

Les ouvrages de génie civil subissent des altérations dues au temps mais aussi à l'environnement auquel ils sont exposés. Dans le comportement du béton armé, un des aspects fréquents est la fissuration, inséparable de son fonctionnement, mais qui peut engendrer des conséquences pathologiques. En outre, Les structures sont parfois soumises à des sollicitations extrêmes telles que des chocs et des séismes, dont les conséquences peuvent être désastreuses.

Le béton est un matériau fortement basique dont le pH varie de 12.5 à 13.5, et que, pour cette raison, il est vulnérable (fragile) aux attaques acides et, plus particulièrement, à celles faisant intervenir des acides forts (milieu environnant). Ce déséquilibre favorise de multiples formes d'agressions chimiques [16]. La pluie, brouillard, neige, eaux souterraines, eau de mer..., sont le premier vecteur d'agression. Ces eaux chargées de substances chimiques agressives (chlorures, sulfates, dioxyde de carbone...) pénètrent dans le béton par les réseaux de fins capillaires qui le parcourent dans sa masse, ou par des fissures [16]. L'attaque du béton par l'ensemble de ces processus complexes entraîne une réduction des propriétés structurelles du matériau, telles que la résistance en compression,...

L'objet du présent chapitre est de dresser un panorama de l'essentiel des pathologies affectant les ouvrages en béton en les classant en fonction de leur origine. A l'issue des travaux de recherches, il y a trois types de pathologies d'ouvrages:

- Pathologies d'origine chimique.
- Pathologies d'origine physique.
- Pathologies d'origine mécanique

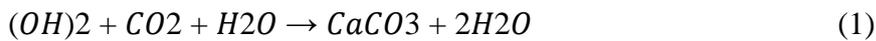
1.2. Pathologies d'origine chimique

1.2.1. Carbonatation du béton

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui touche tous les bétons, issu de la réaction entre les composés du ciment, en particulier la portlandite $(OH)_2$, et le dioxyde de carbone atmosphérique (CO_2), présent dans l'air à un taux moyen de 0,03 % en volume. Cette réaction a pour effet la diminution du pH du béton de 13 à moins de 9, rendant les aciers vulnérables [9].

Le phénomène de carbonatation est la succession de 3 étapes de réaction [5] :

1. La dissolution du CO_2 dans la solution interstitielle du béton et la formation d'ions CO_3^- ayant l'effet de réduire le pH de la solution.
2. La dissolution de la portlandite $Ca(OH)_2$ pour libérer des ions OH^- permettant de compenser cette baisse de pH.
3. La formation de calcite à partir des ions Ca^{+} issus de la dissolution de la portlandite. Cette succession d'étapes est résumée par la réaction suivante :



La carbonatation ne se produit pas dans un béton totalement sec ou totalement saturé en eau. La vitesse de carbonatation est maximale pour les bétons traditionnels quand l'humidité relative est comprise entre 40 % et 65 % (Fig. 1.1).

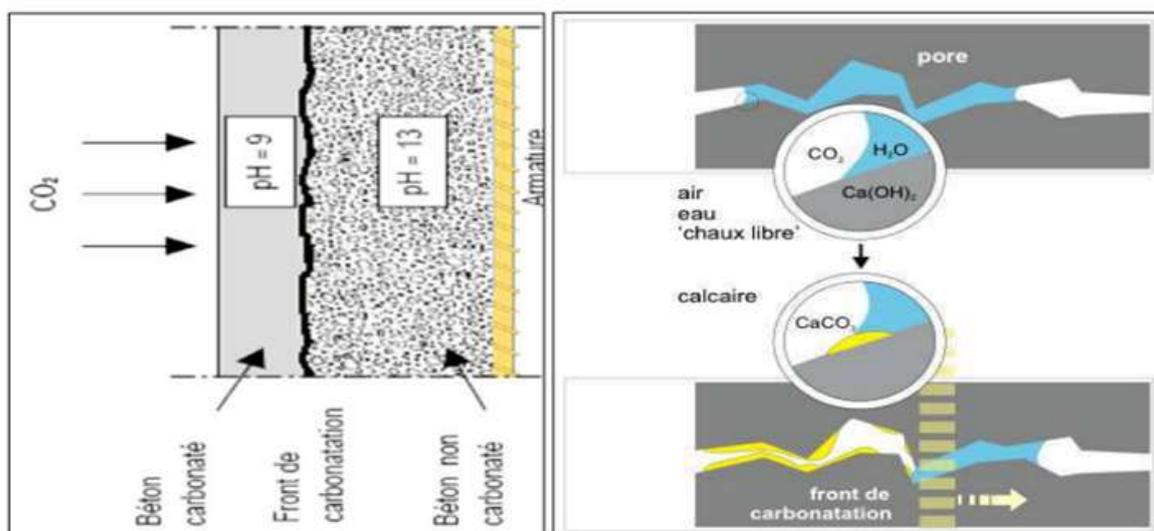


Figure.1.1. Processus général de la carbonatation [5]

Les conséquences de cette réaction chimique sont très dommageables pour les armatures qui se trouvent à un pH où elles ne sont plus passivées et peuvent alors se corroder [11]. La rouille foisonne et fait éclater l'épiderme du béton déplaçant du même coup le front de carbonatation [11].

1.2.2. Corrosion des armatures

La corrosion des aciers d'armatures dans le béton est issue d'un processus chimique. La corrosion des armatures survient lorsque la protection assurée par le béton n'est plus efficace. Ceci se produit dans les deux cas suivants :

- Lorsque le béton qui recouvre l'armature a été carbonaté. La dissolution du fer conduit à la formation de produits de corrosion (rouille) beaucoup plus volumineux que le volume initial de fer. Il en résulte une dilatation et un éclatement du béton. L'élimination physique de la couche de protection en béton conduit à un accroissement de la vitesse de corrosion de l'armature [27].
- Lorsque des ions agressifs (comme des chlorures) ont traversé l'épaisseur du béton d'enrobage et entrent en contact avec l'armature [6].
- L'acier ne peut se corroder que s'il est mis simultanément en présence d'eau et d'oxygène [27].

La (figure 1.2) : présente les différentes étapes de dégradation due à la corrosion.

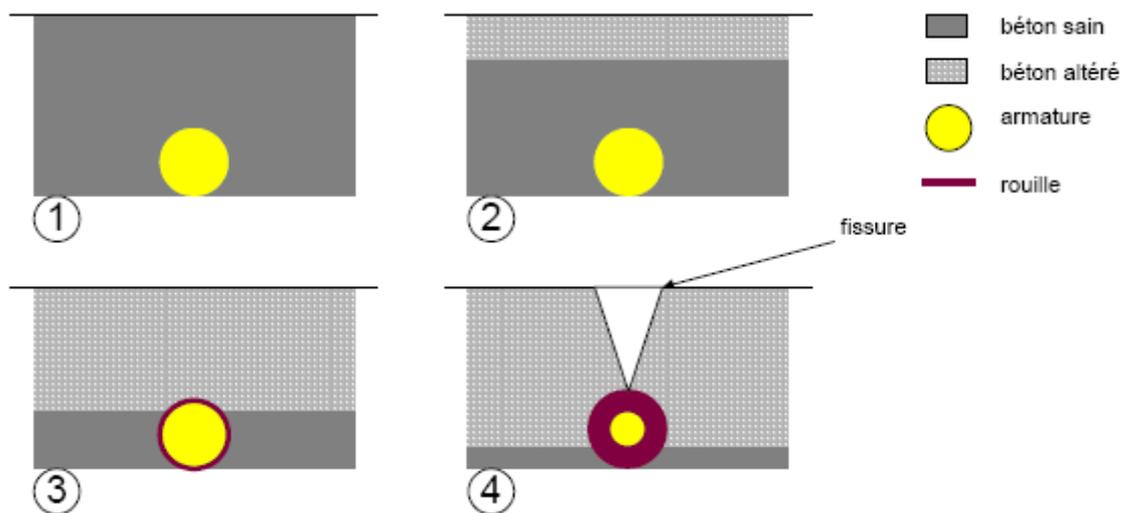


Figure.1.2 : (1) le béton sain, (2) un agent agressif pénètre progressivement, (3) lorsque sa teneur est assez forte, l'armature commence à se corroder et (4) la rouille peut faire éclater l'enrobage [22]

Les ouvrages et éléments concernés par la corrosion des armatures sont les suivants :

- **Bâtiments:** acrotères et balcons, éléments verticaux et terrasses, en milieux industriels et maritime. Ce sont bien sûr les éléments les plus sensibles des bâtiments, du fait soit de leur minceur, soit de la difficulté à maintenir des enrobages suffisants [22].
- **Ponts et ouvrages d'art:** dans cette catégorie d'ouvrages, il apparaît que les zones les plus sensibles soient les tabliers, poutres (Fig.1.3) [22].



(a) Pont à poutre



(b) Pile de pont

Figure 1.3. Exemples : corrosion des armatures [27].

Les conséquences de la corrosion [22] sur la structure sont:

- ✓ réduction de section de l'armature corrodée
- ✓ fissurations et les fracturations du béton
- ✓ décollement du béton d'enrobage
- ✓ diminution de l'adhérence acier-béton
- ✓ sécurité vis-à-vis des usagers
- ✓ stabilité de la construction, dans le cas d'une corrosion uniforme et généralisée, la ductilité des poutres (en termes de flèche) est beaucoup moins affectée [22] et la perte d'adhérence joue probablement un rôle important dans ce phénomène (Fig.1.4).

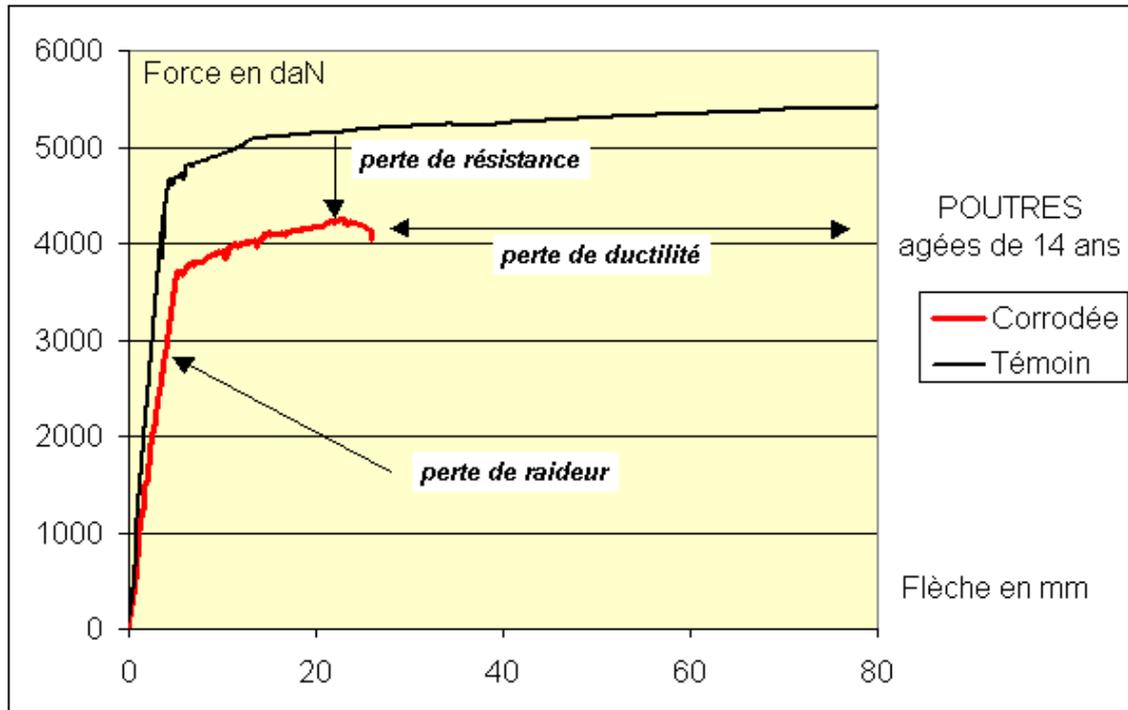


Figure 1.4. Comportement force-flèche (essai de flexion 3 points) [3]

1.2.3. Réactions sulfatiques

Les réactions sulfatiques sont provoquées par l'action des sulfates provenant du milieu extérieur (eaux souterraines, remblais contenant des sulfates, pluies acides, les eaux usées,...), avec la chaux et les aluminates du ciment. Le produit final de la réaction est l'étrangéité, dont le développement au sein du béton provoque une expansion qui altère les caractéristiques mécaniques du béton [15].

1.2.4. Attaques par les acides

Les principaux agents agressifs sont les sulfates et les acides. L'acide sulfurique est connu comme une des sources les plus communes de dégradation.

Le béton est susceptible d'être attaqué par différents types d'acides (acide sulfurique, nitrique, phosphorique, acétique, lactique, ...) [2], par exemple:

- Les structures enterrées en béton peuvent en effet être attaquées par les eaux contenues dans le sol et chargées naturellement (par oxydation de minéraux comme la pyrite) ou de par le dépôt de déchets chimiques industriels
- Quant aux tuyaux d'égout, ils peuvent être le siège d'un phénomène d'attaque complexe: les eaux qu'ils transportent contiennent des composés soufrés et des bactéries de sulfate qui transforment ces composés en acide sulfhydrique (H₂S), un

gaz qui s'échappe des eaux usées. Ce dernier peut ensuite être oxydé par d'autres bactéries, puis transformé en acide sulfurique (H₂SO₄), qui attaque le béton.

- Les pluies acides constituent également une source d'agression pour les structures en béton (des pH de 5 à 3 ont été mesurés) [2].
- la dégradation chimique des structures en béton exposées à des substances agricoles. Les acides acétique et lactique existant dans les liquides qui se forment à l'intérieur des silos lors de la fermentation des aliments [17], sur le sol des dépôts ou des hangars en présence d'eau (salive).

L'attaque du béton par les acides comprend un ensemble de processus complexes qui entraînent une réduction des propriétés structurales du matériau, telles que la résistance en compression. Tout comme les granulats calcaires, le béton est un matériau basique (son pH est supérieur à 12,5) susceptible d'être attaqué par les acides [17]. Les attaques acides se font principalement suivant un mécanisme de dissolution. Le phénomène de dissolution peut être accompagné de la précipitation du sel formé lors de la réaction:

Rappel : base + acide → sel + eau

Si le sel est peu soluble, ce sel peut avoir un effet colmatant et ralentir les réactions de dissolution [17].

Divers paramètres peuvent être utilisés pour mesurer les dégradations:

- la réduction de volume [17],
- la perte de poids,
- la baisse de résistance en compression,
- le changement de pH de la solution de simulation,
- la profondeur de pénétration de l'acide,

1.3. Pathologies d'origine physique

1.3.1. Retrait

Le retrait du béton est un phénomène physico-chimique et qui se développe sous diverses formes depuis la prise du béton jusqu'à son vieillissement. Il correspond à l'action du départ de l'eau excédentaire du béton vers l'extérieur et/ou au dégagement de chaleur au cours de la réaction chimique d'hydratation (réaction exothermique). Le symptôme caractéristique de l'action du retrait sur un ouvrage est la fissuration qui peut être soit orientée, soit multidirectionnelle [15].

Les différents types de fissures de retrait peuvent être classés, suivant leur ordre chronologique d'apparition, en trois types de l'élément de structure [12].

v **Fissures apparaissant une ou deux heures après le bétonnage**: ces fissures sont provoquées par le tassement du béton frais. Elles sont relativement profondes et ouvertes et affectent les surfaces horizontales provoquant un gradient vertical de l'ensemble des caractéristiques physiques et mécaniques [12].

v **Fissures apparaissant juste après le décoffrage** : ces fissures affectent aussi bien les surfaces horizontales que les parements verticaux. Ces fissures sont généralement fines et peu profondes, mais elles peuvent être plus ouvertes lorsque le retrait thermique en est la cause. En fait, le retrait thermique est lié directement à l'élévation de température du béton [43].

❖ **Fissures apparaissant plusieurs jours ou plusieurs mois après le décoffrage** : ces fissures sont créées par le retrait à long terme. Ce retrait résulte du départ de l'eau en raison de la mise en équilibre hygrométrique de la structure en béton avec son milieu extérieur [12].

Quatre types de retrait (thermique, plastique, endogène et dessiccation) [2] peuvent être à l'origine de l'apparition de fissure sur la surface des ouvrages en béton armé

1.3.1.1. Retrait de dessiccation

Le retrait de dessiccation est lié au séchage qui se manifeste avant, pendant et après la prise du béton. En fait, ce retrait est dû à un déséquilibre hygrométrique entre le milieu extérieur et le matériau [43]. La fissuration qui en résulte est due à la dépression capillaire qui se produit lorsque des ménisques d'eau se forment dans les pores capillaires du béton frais. Ce retrait, qui est donc consécutif à l'évaporation de l'eau peut se manifester quelques minutes après la mise en œuvre du béton et se poursuivre quelques semaines après. Il est de l'ordre de 1mm/m.

1.3.1.2. Retrait Endogène

Le retrait endogène apparaît avec les bétons présentant un rapport eau/ciment (E/C) faible et une teneur élevée en fines [43]. Le retrait endogène augmente avec la diminution du rapport E/C. Dans ce sens, les bétons spéciaux, tels que le béton à hautes performances (BHP) et le béton autoplaçants (BAP) sont caractérisés par des compositions différentes de celles des bétons ordinaires. En raison du faible rapport E/C et/ou de la quantité élevée de fines des BHP et des BAP, les effets mécaniques du retrait endogène apparaissent comme prépondérants.

1.3.1.3. Retrait plastique

Le retrait plastique est causé par le départ prématuré de l'eau de gâchage à partir de la surface de béton [43]. L'ordre de grandeur du retrait plastique est de 1 à 5 mm par mètre selon la vitesse d'évaporation de l'eau du béton (Fig1.5). La fissuration plastique affecte les bétons de mauvaise qualité [7].

1.3.1.4. Retrait thermique

Le retrait thermique est lié directement à l'élévation de température du matériau [43]. Les paramètres clés de l'élévation de températures sont :

- ✓ Composition de ciment et sa finesse
- ✓ Dosage en ciment,
- ✓ Rapport de la masse d'eau à la masse de liant (E/C)

D'un côté l'augmentation de la quantité de ciment augmente la quantité de chaleur dégagée, mais de l'autre la réduction du rapport E/C diminue la quantité totale de chaleur dégagée [43].

Après la prise, le refroidissement du béton se traduit donc par un retrait thermique qui peut provoquer l'apparition de fissures (Fig1.5)[7].

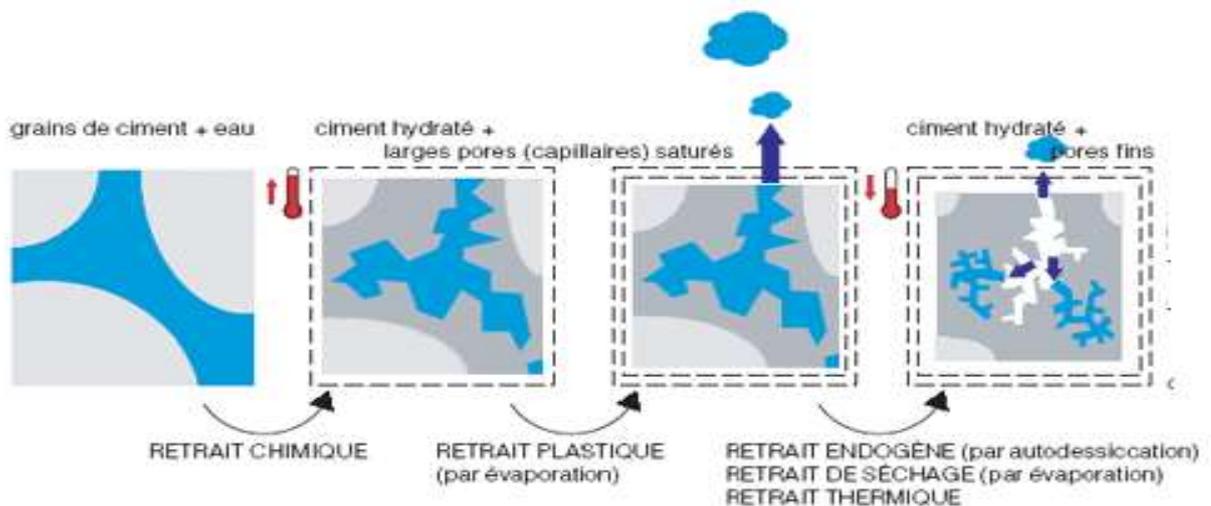


Figure 1.5 : Principaux types de retrait du béton [7].

La conséquence essentielle de ces retraits est l'apparition de phénomènes de fissuration pouvant diminuer la durabilité des ouvrages en béton armé ou précontraint, et ou limiter leur capacité portante.

1.3.2. Cycle Gel-dégel

Dans le cas des ouvrages réalisés dans les climats froids, le béton est soumis à des altérations dû au cycle de gel/dégel. L'eau contenue dans les pores gèle à une température inférieure à zéro (-3°C à -4°C). Le passage de l'eau de l'état liquide à l'état solide engendre des pressions hydrauliques sur des capillaires restés à l'état liquide, produisant ainsi une augmentation du volume massique de béton de l'ordre 9%. Dans le cas où les pressions hydrauliques deviennent supérieures à la résistance à la traction du béton, celui-ci se fissure [7]. La succession des cycles d'humidification et de gel élargit peu à peu ces microfissures qui amèneront la destruction en surface du béton (l'écaillage du béton) sous la forme de plaquettes (Fig.1.6).



Figure 1.6.Dégradation d'un ouvrage soumis au gel dégel [19].

1.4. Pathologies d'origine mécanique

1.4.1. Les chocs

Il s'agit le plus souvent d'action accidentelle de type mécanique (ou naturel : séisme) qui se concrétise par des chocs [12] . Les chocs les plus fréquents sont ceux des poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts, les chocs de bateaux ou d'objets flottants contre les piles en rivière (Fig.1.7).



Figure 1.7. Choc sur une pile de pont.

Par ailleurs, les désordres induits par les séismes le plus souvent observés sur les structures peuvent être assez variés, et différent selon leur type [40]. Sur les ponts [45], les désordres générés par un séisme peuvent être les suivants :

- ✓ échappement du tablier de ses appuis (Fig.1.8-a)[35],
- ✓ endommagement des culées (Fig.1.8-b), des murs de soutènement ou encore des fondations [36],



(a) Echappement du tablier (Kobe, 1995



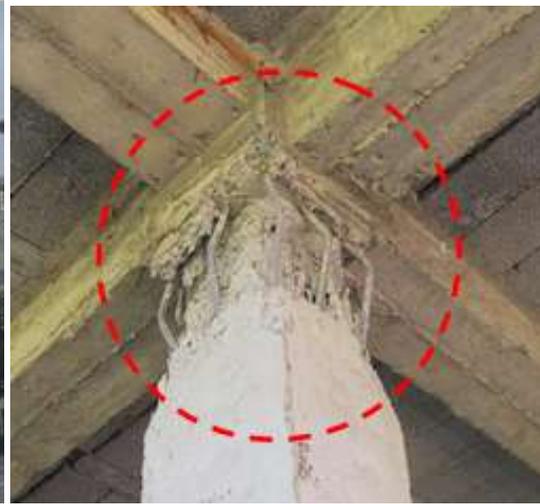
(b) Rupture par affaissement et rotation de la culée

Fig. 1.8. Endommagement des ouvrages en béton armé [36]

En ce qui concerne les bâtiments, on peut être confronté, suite à un séisme, à plusieurs désordres. Parmi ceux-ci, il est ainsi possible de citer :

- la destruction des étages supérieurs, intermédiaires ou inférieurs (Fig.1.8-a),

- la rupture des têtes de poteaux pouvant entraîner la ruine totale si les poutres ont été dimensionnées plus largement que les poteaux (alors qu'en règle générale on opte pour un schéma type poteau fort - poutre faible) (Fig.1.9-b),
- Écrasement du béton (Fig.1.9-c),
- Absence de cadres dans le nœud (Fig.1.9-d).



(a). Effondrement de l'étage inférieur (Kobe, 1995).

(b). Rupture des têtes de

poteaux (séisme de Boumerdes 2003)



(c). Absence de cadres dans le nœud

(d). Écrasement du béton (séisme de Boumerdes 2003)

Fig. 1.9. Endommagement (cas des bâtiments).

1.4.2. Fissuration d'origine mécanique

La présence de fissures sur une structure en béton armé témoigne généralement d'un endommagement de cet élément [7].

Les causes de la fissuration d'un ouvrage en béton armé sont :

- Erreurs de conception et d'exploitation :

- Un manque d'armatures.
- Un manque de joints.
- Une poussée à vide dans les escaliers.
- Tassements.

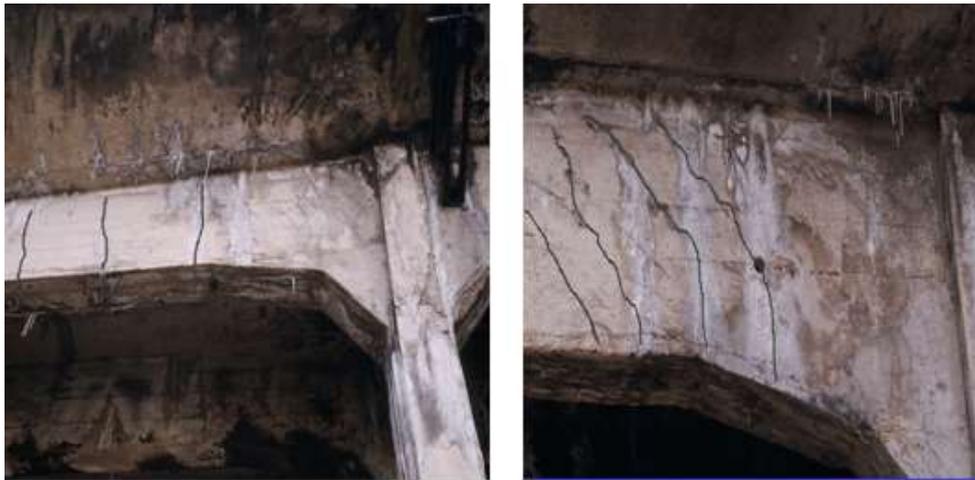
- Défauts d'exécution :

- Liaisons non conformes aux calculs.
- Déplacements des coffrages.
- Une mauvaise formulation du béton.
- Une mauvaise position des armatures d'aciers.
- Un recouvrement insuffisant des armatures d'aciers.
- Ferrailages denses, nœuds complexes et recouvrements de barres.
- Insuffisance des aciers de répartition.
- Décoffrage prématuré.

- Modification des conditions d'exploitation ou d'utilisation des ouvrages

Dans le cas des ouvrages d'art, l'évolution des conditions d'exploitation par suite soit de la modification des charges réglementaires, soit de la modification de la fréquence de passage des véhicules. Exemple: la mise en conformité des bâtiments et des ponts vis à vis des sollicitations sismiques, qui constitue une question de grande actualité. L'expérience des derniers séismes a en effet montré que le patrimoine bâti présentait un risque sismique très sérieux en cas de tremblement de terre [6].

En conséquence, les ruptures peuvent aussi se produire brutalement, sans prévenir par des déformations visibles: Rupture par efforts tranchant ou rupture par flexion (Fig 1.10).



(a) Fissures de flexion

(b) Fissures d'effort tranchant

Fig. 1.10. Pont à poutres

1.5. Conclusion

En conclusion, c'est l'art de reconnaître les maladies par leurs symptômes et de les distinguer les unes des autres. Le diagnostic doit identifier la pathologie, statuer sur la cause des désordres, les facteurs qui les déclenchent ou les entretiennent et l'évolution probable de la situation.

En effet, le choix de la méthode du renforcement/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 et des conditions de chantier. La notion de renforcement ayant pour objectif d'améliorer les performances de la structure vis-à-vis de conditions d'exploitations modifiées ou d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage. Ainsi, la notion de réparation visant à restituer les caractéristiques initiales de portance (rigidité, résistance).

Différentes technologies de renforcement/réparation et de maintenance des ouvrages sont couramment utilisées depuis de nombreuses années.

CHAPITRE 2

**TECHNIQUES DE
RENFORCEMENT/REPAR
ATION DES OUVRAGES
EN BETON ARME**

2.1. Introduction

Un ouvrage en béton armé est dimensionné pour une durée de vie de cent ans en moyenne. Toutefois, plusieurs types de désordres viennent réduire cette durée de vie envisagée. Aujourd'hui, un ouvrage sur quatre nécessite une maintenance pour assurer la sécurité des usagers.

La maintenance des ouvrages de génie civil consiste à les protéger en assurant une meilleure étanchéité ou en limitant la corrosion et à les renforcer en améliorant les performances et la durabilité des ouvrages [12].

De nombreuses solutions techniques sont disponibles et maîtrisées, elles ont fait la preuve de leur efficacité et répondent à l'ensemble des problèmes potentiels rencontrés sur les matériaux ou sur les structures. Il convient de choisir la solution technique adaptée à la pathologie à traiter, après un diagnostic complet et précis des désordres, de leurs causes et de leurs évolutions

La réussite des travaux de réparation des ouvrages en béton nécessite un travail en commun d'experts et le respect de quelques principes clés de base. A titre d'exemple:

- Toute réparation sans un diagnostic préalable ou issue d'un diagnostic erroné est vouée à l'échec
- Le choix de la technique de réparation peut se prendre qu'après un diagnostic précis de la structure et une détermination des causes et de l'étendue des désordres

Il existe différentes solutions techniques de renforcement/ réparation des ouvrages en béton armé [23]. Ces diverses solutions techniques permettent:

- ❖ un traitement esthétique
- ❖ une réparation non structurelle
- ❖ une réparation structurelle

Certes, ces différentes solutions techniques permettent:

- d'augmenter la résistance
- d'augmenter la ductilité
- de modifier la rigidité

2.2. Les techniques de renforcement

Il existe différentes techniques de renforcement/ réparation:

- Adjonction d'armature complémentaire
- précontrainte additionnelle.

- Traitement des fissures
- Renforcement par béton projeté.
- Tôles collées
- Renforcement par addition de nouveaux éléments de construction verticaux et/ou horizontaux.
- Renforcement au moyen de matériaux composites.

2.2.1. Précontrainte additionnelle

Les progrès technologiques accomplis dans le domaine de la réparation ont fait évoluer la conception du câblage puisque ils sont conçus, avec une précontraintes partiellement ou totalement extérieur.

-Sur le plan mécanique, la précontraintes additionnelle extérieure se caractérise par de faibles pertes de tension par frottements, la possibilité d'ajuster assez facilement le tracé des câbles en fonction des effets recherchés [9,14].

-Sur le plan pratique, elle offre une assez grande facilité d'installation et la possibilité d'un contrôle efficace de l'exécution [9].

Elle est réalisée le plus souvent par la mise en œuvre d'armatures de précontrainte (câble ou barres). Compte tenu de son efficacité et de sa souplesse de mise en œuvre, la précontrainte additionnelle peut être employée pour réparer une grande variété d'ouvrage (ponts, barrages, réservoir, silos...) ou éléments structuraux tels: dalles de plancher ou Poutres. Cette méthode est particulièrement adaptée à la réparation en flexion et vis-à-vis de l'effort tranchant par l'emploi d'étriers actifs. (Fig. 2.1). En revanche, la mise en œuvre de tout ce qui concerne la protection définitive des armatures nécessite un niveau particulier de qualité. De plus, le recours à des unités de plus en plus puissantes pour en limiter le nombre implique une étude particulièrement soignée des zones d'ancrage, très fortement sollicitées [12].

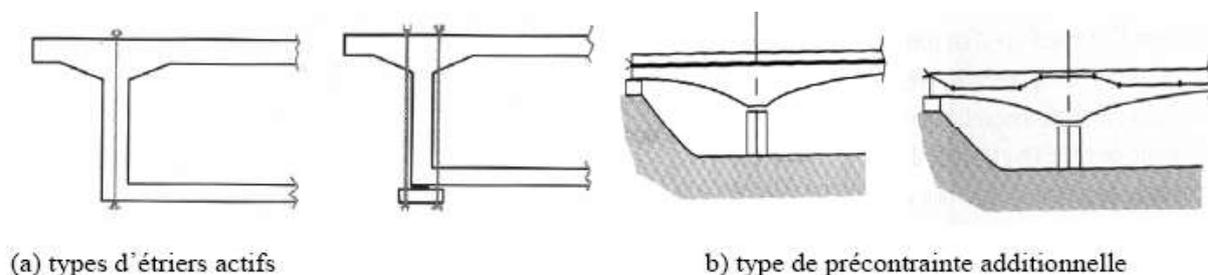


Figure.2.1. Différents types de réparation par précontrainte additionnelle [15].

2.2.2. Projection des bétons

Cette technique est largement répandue tant sur le plan de renforcement des structures ou éléments structurels défectueux et exigeant une mise en œuvre soignée. Le béton projeté peut éventuellement être associé avec un autre mode de réparation, qui est rajout d'armatures d'aciers (Fig. 2.2). Cette méthode de projection de béton peut être réalisée, soit par voie sèche ou bien par voie humide [25].

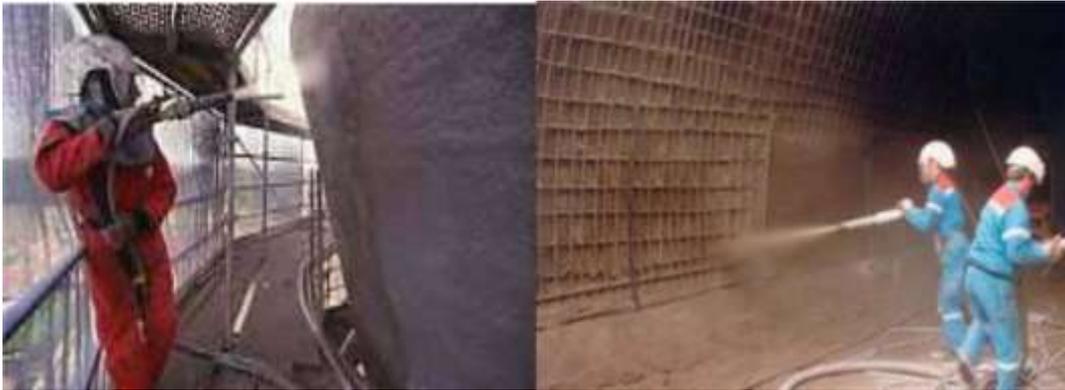


Figure.2.2. Renforcement au moyen de béton projeté

a) Projection par voie sèche

Le mélange sec (granulats, ciment et éventuellement accélérateur de prise et adjuvants) est fabriqué dans un malaxeur puis propulsé par de l'air comprimé vers la lance de projection. Cette lance est associée à une lance de projection d'eau (Fig. 2.3) [50].

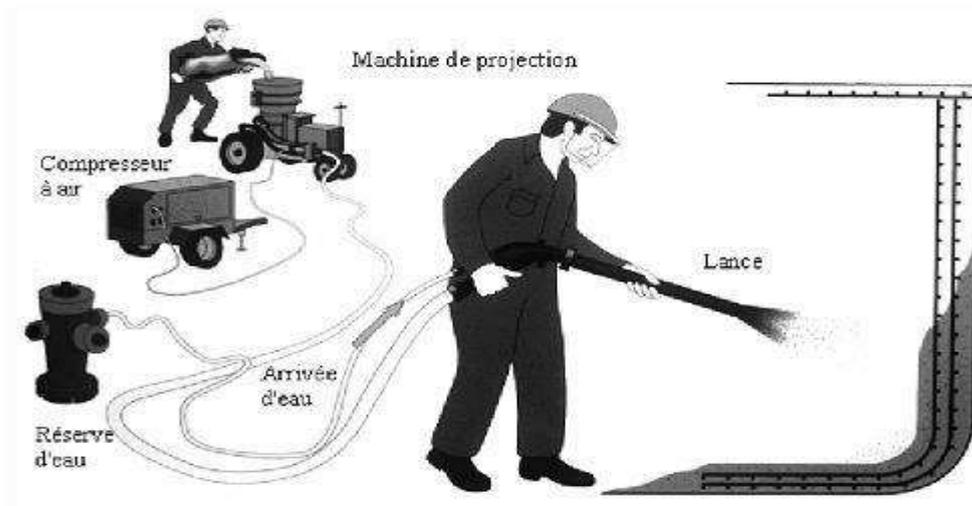


Figure.2.3. Projection par voie sèche [56]

b) Projection par voie humide

Le mélange comprenant l'eau est stocké après malaxage dans une trémie (Fig.2.4). Il est ensuite pompé jusqu'à la lance de projection et projeté grâce à l'air comprimé [25].

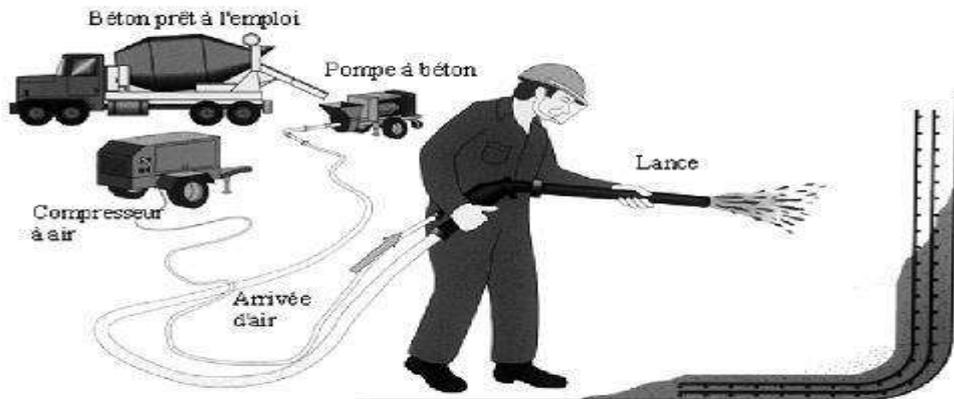


Figure.2.4. Projection par voie humide [56].

La projection est possible dans toutes les directions, en particulier en plafond (Fig. 2.5).[15,41].

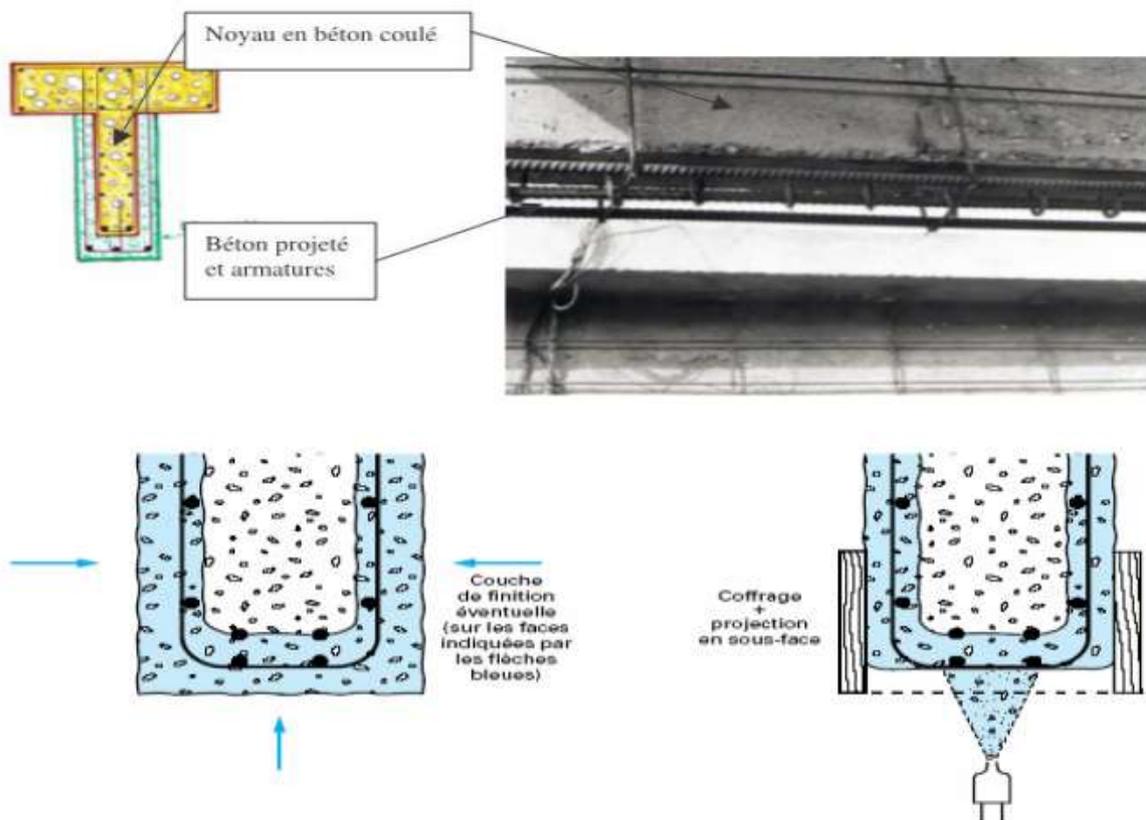


Figure.2.5 : Renforcement de poutre par béton projeté [41]

2.2.3. Chemisage en béton armé

Le chemisage en béton armé consiste en une augmentation considérable des sections (Fig. 2.6 (a+b)) 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 [9].

Cette technique de renforcement présente des avantages et des inconvénients.

- Avantages [42]:

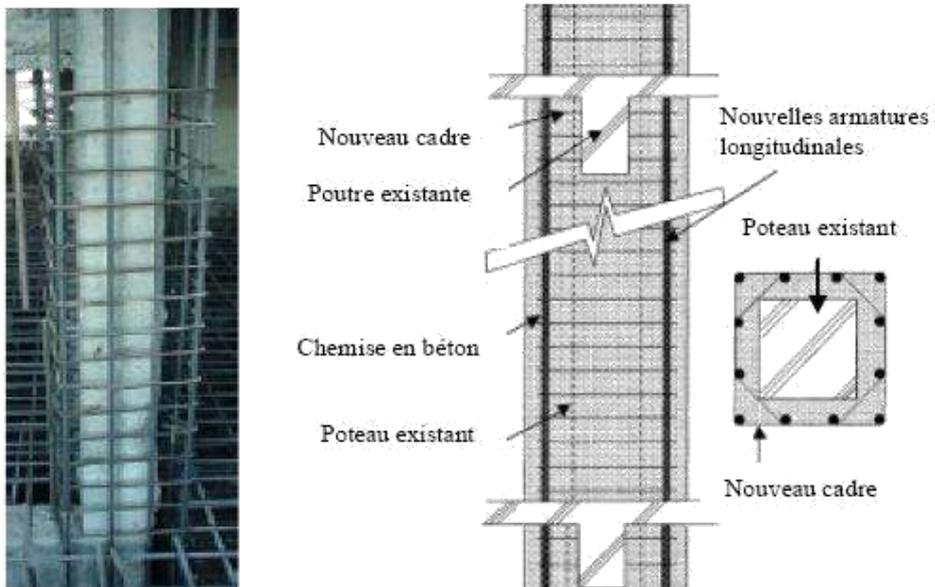
- Technique peu coûteuse du fait des matériaux utilisés.
- Main d'œuvre peu qualifiée.

- Inconvénients [42]:

- Augmentation 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 coffrages.
- Mise en œuvre souvent difficile.

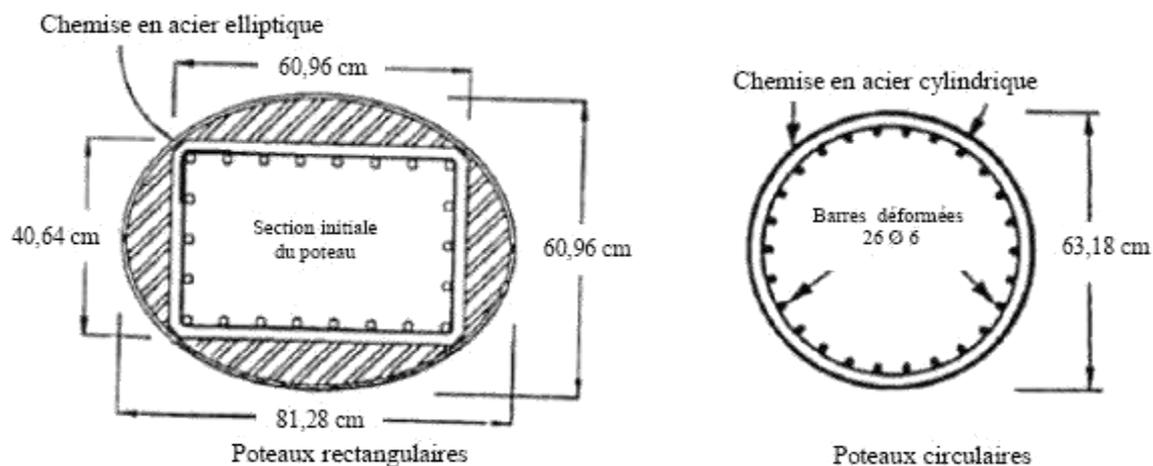
Pour les chemisages en acier, l'action de confinement est plus efficace dans le cas de poteaux à section circulaire qu'à section rectangulaire. Plusieurs ponts dont les piles étaient renforcées avec des chemises en acier se trouvaient dans des régions ayant subi des secousses intenses. Aucun de ces piles ne semble avoir subi de dommages importants [14]. Pour les poteaux circulaires, les chemises prennent la forme de deux demi-couches légèrement surdimensionnées pour faciliter leur installation, soudées sur place aux jointures verticales. Pour les poteaux rectangulaires, la chemise est habituellement roulée en forme elliptique et les espaces les plus larges entre le tubage et le poteau sont remplis de béton plutôt que de coulis de ciment [39] (Fig.2.7).

Toutefois, cette technique est coûteuse et exigeante en main-d'œuvre. Compte tenu de la grande efficacité de cette technique et de son coût, les chemises en acier pourraient éventuellement être utilisées dans les installations industrielles possédant un nombre restreint de poteaux nécessitant un renforcement. Cependant, dans le cas des bâtiments types où plusieurs poteaux doivent être renforcés, cette technique s'avère trop onéreuse [42].



(a) Seisme de Boumerdes 2003

Figure.2.6. Chemisage des poteaux en béton armé [30]



(b). Disposition du ferrailage

Figure.2.7. Renforcement de poteaux circulaires et rectangulaires avec des chemises en acier [39]

2.2.4. Tôles collées

L'Hermite (1967) [30] s'est intéressé, dès le début des années soixante, à l'utilisation de ces composés adhésifs polymérisant à froid pour associer du béton à des composants d'acier disposés extérieurement (Fig. 2.8).

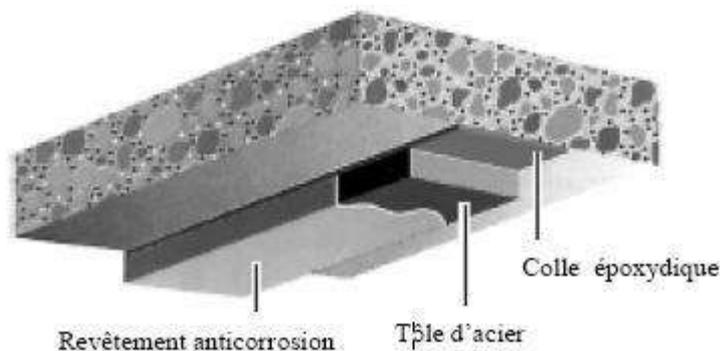


Figure.2.8. Application de plats métalliques selon le procédé L'Hermite (Hamelin 2002) [24]

Ce type de renforcement consiste à pallier les insuffisances locales ou globales des structures en béton par des tôles d'acier.

L'utilisation de ce type de renforcement comporte des avantages et des inconvénients :

- **Avantages** [31]:

- Il n'exige que des interventions mineures sur la structure.
- Il est d'un emploi souple.

- Les renforts sont peu encombrants.

- Inconvénients [31] :

- Sensibilité de l'acier à l'oxydation.
- Impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles.
- Nécessité d'une préparation spécifique de la surface à traiter.
- Nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine de collage.
- Impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masse manipulées trop importantes), ce qui limite d'autant les possibilités de réparation (Fig.2.9(a)).

La technique du collage est améliorée, en perforant les tôles collées (Fig.2.9(b)).



(a)



(b)

Figure.2.9. Tôles collées: (a) difficulté de manutention ; (b) Renforcement du viaduc de Terrenoire partôles collées perforées) [31]

2.2.5. Traitement des fissures

Le choix de la technique adaptée est fonction des caractéristiques de la fissuration :

- ouverture (microfissures, fissures fines, fissures moyennes),
- profondeur,
- activité (mortes, actives),

Les différents traitements des fissures sont résumés dans la Fig.2.10

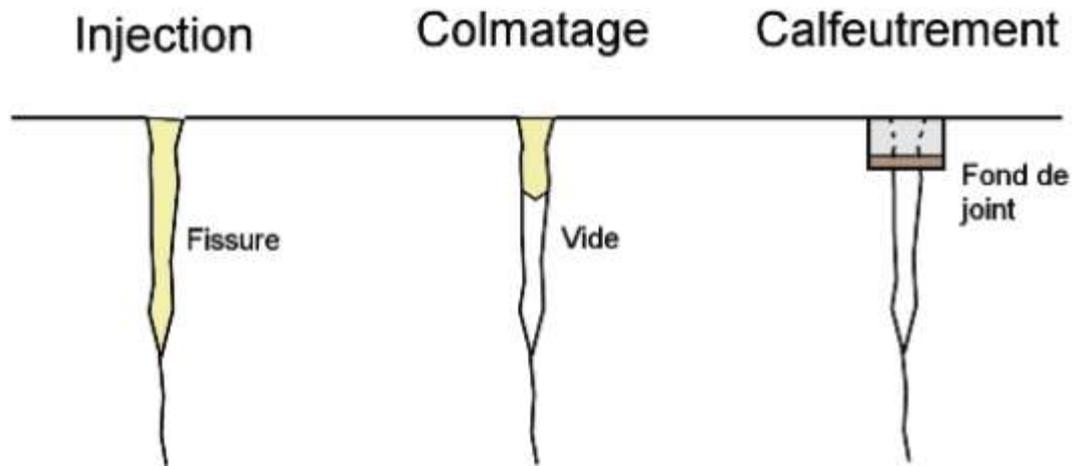


Figure.2.10. Les différents traitements des fissures [23]

- **Injection** : pénétrer dans la fissure un produit qui va créer une continuité mécanique et/ou une étanchéité entre les parties disjointes (Fig.2.10).
- **Colmatage**: un remplissage partiel au moyen d'une injection sur une certaine profondeur de la fissure (Fig.2.10)[23].
- **Calfeutrement**: colmater définitivement et en profondeur une fissure au moyen d'un produit souple (mastic ou mortier) afin de rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau mais sans bloquer les mouvements de la fissure (**fig.2.10**) [23].



(a). Calfeutrement de fissures à l'aide d'un mortier (b) Calfeutrement d'une fissure à l'aide à base de liants hydrauliques d'un mastic à base de liants organiques

Figure.2.11. Technique de Calfeutrement [23]

2.2.6. Renforcement par matériaux composites collés

Les matériaux composites appartenant à la famille des Polymères Renforcés de Fibres (PRF) conviennent pour une gamme très étendue d'utilisations dans le domaine de la construction. Ils peuvent se présenter: feuilles, tissus ou enveloppes préformées, lamelles pultrudées, collés sur les parois extérieures de la structure (moulage au contact), sous forme d'engravure, de profilés structuraux ou encore sous forme de barres pour le renforcement interne du béton. Ces matériaux présentent une contrainte de rupture très élevés pour une densité cinq fois moindre que celle de l'acier [29].

Deux types de produits de construction en matériaux composites sont principalement utilisés: les tissus (secs ou pré-imprégnés sous forme de feuilles), et les plats (ou lamelles). Les tissus sont collés sur site et polymérisent lors de la mise en œuvre (moulage au contact), alors que les plats sont préfabriqués (pultrusion). Cependant, ces différents types de matériaux composites ont des propriétés mécaniques proches, qui sont notamment gouvernées par le comportement (résistance et rigidité) des fibres [48].

Les caractéristiques non corrosives des fibres de carbone et leur résistance à la plupart des substances chimiques donnent à ce système de renforcement une durée de vie bien plus longue que celle des matériaux conventionnels tels que l'acier, c'est à dire une valeur plus économique à long terme.

De récentes recherches et tentatives de développement ont révélé que ces matériaux permettraient de renforcer plusieurs structures en béton armé existantes [48, 26].

La conception du système multicouche composite (Fig. 2.13) a pour objectif de remplir plusieurs fonctions (Hamelin 2002) [24] : rendre sain l'état de surface de la couche support, appliquer un nombre de couches de matériaux composites suffisant pour assurer la stabilité de l'ouvrage; procéder à un placage de feuilles de placo-plâtre ou à la projection de couches à fort taux de charges minérales pour améliorer la tenue au feu et en température du système, ...

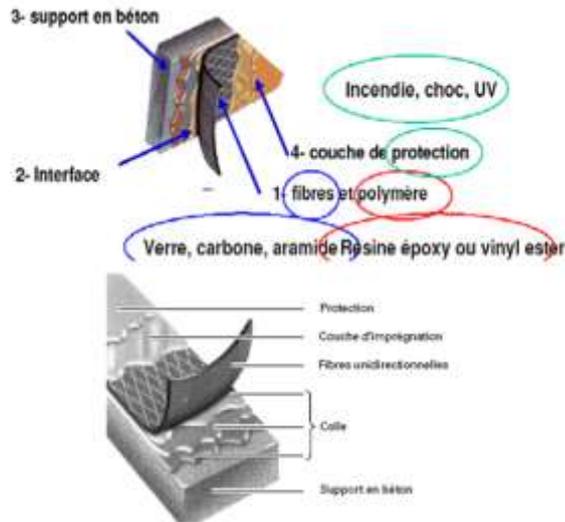


Figure.2.12. Conception du système multicouche [1].

Le processus de renforcement passe généralement par les étapes suivantes (Fig. 2.14) [13]:

1. Inspecter la surface de l'élément de structure à renforcer.
2. Réparer les fissures et les surfaces altérées avec une injection d'époxy et de mortier à base de résine époxy.
3. Préparer la surface de l'élément de structure (avec des meules et du sablage humide au besoin) en éliminant les saillies et en s'assurant que le profil est adéquat.
4. Appliquer une couche d'apprêt puis du mastic de vitrier afin d'assurer l'adhérence des tissus de fibres.
5. Appliquer une première couche d'agent d'imprégnation.
6. Appliquer les tissus de fibres sur la surface, comme s'il s'agissait de papier peint.
7. Appliquer une deuxième couche d'agent d'imprégnation, une fois que les tissus auront bien durci, généralement au bout d'une heure.
8. Répéter les étapes 6 et 7, jusqu'à ce que toutes les couches de fibres soient installées.



Figure.2.13. Procédé de mise en œuvre des matériaux composites [12, 43].

D'une manière générale, les matériaux composites du type polymère renforcé de fibres «PRF» présentent des avantages considérables dès qu'il s'agit de la protection et le renforcement d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrages en béton armé tels que poutre, poteau, dalle ou mur.

- Le renforcement vis à vis la résistance à la flexion d'une poutre en béton armé simplement appuyée en utilisant les composites «PRF» est généralement réalisé par collage externe des lamelles «PRF» sur le support de la poutre concernée (Fig. 2.15) [46].

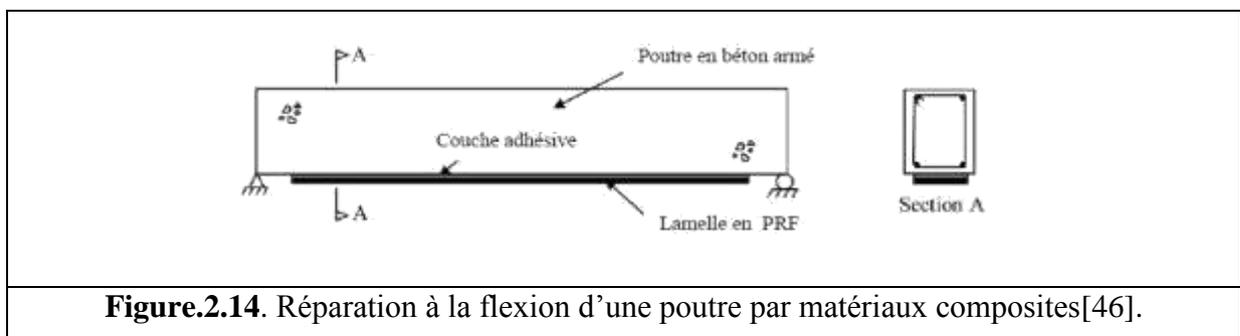


Figure.2.14. Réparation à la flexion d'une poutre par matériaux composites[46].

Par ailleurs, la figure 2.16 présente différentes configurations de collage de matériaux composites sur une poutre, chaque configuration est prévue pour un objectif particulier [50].

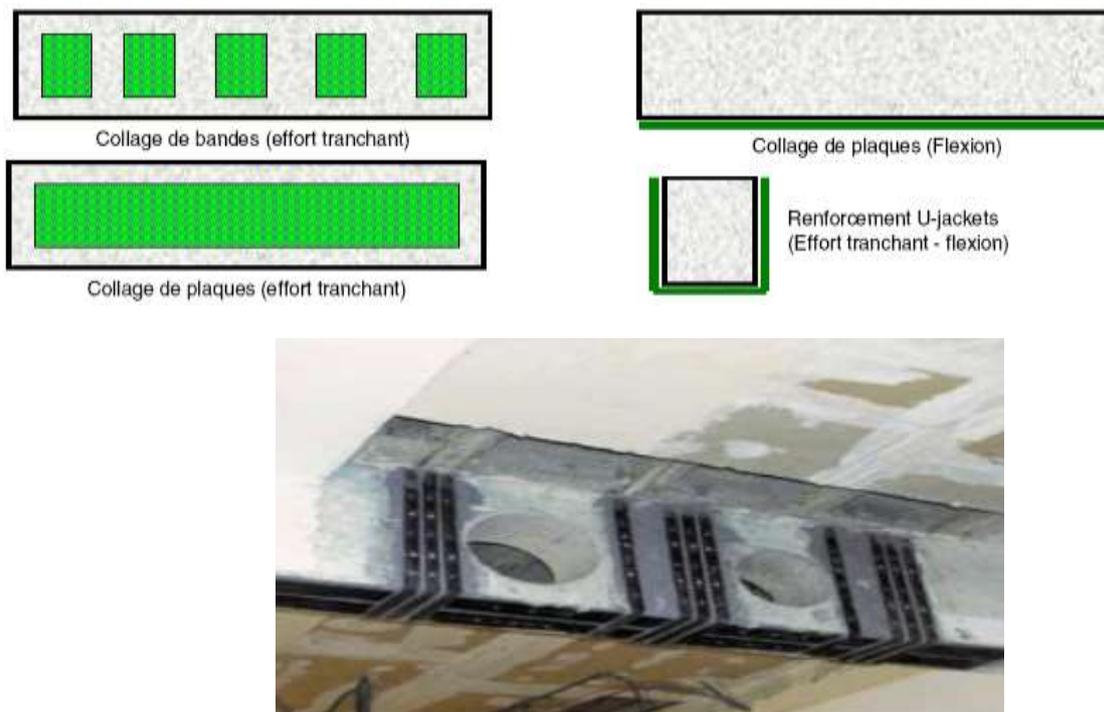


Figure.2.15. Les différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques en composites [37]

- La procédure de base de renforcement des dalles simplement appuyées par «PRF» est de coller des bandes ou des lamelles «PRF» sur la face tendue de la dalle. Pour les dalles travaillant dans les deux sens on utilise des lamelles croisées (Fig. 2.17), ou bien des «PRF» avec des fibres dans les deux directions [48].

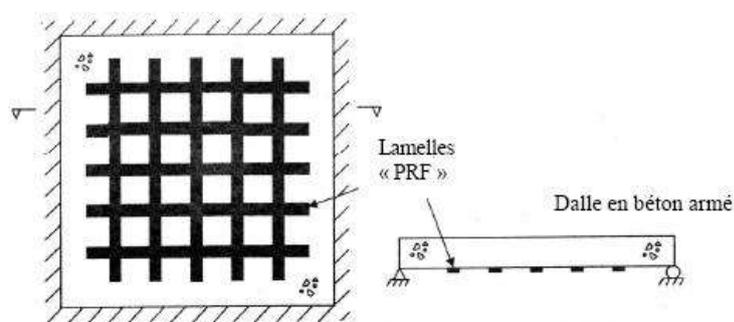


Figure.2.16. Renforcement d'une dalle (deux directions) [48].

- Les 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. Une colonne peut être enveloppée complètement par des tissus «PRF» avec une ou plusieurs couches (Fig.2.18-a) [36]. Elle peut être aussi partiellement enveloppée en utilisant des lanières «PRF» sous forme d'une spirale continue (Fig. 2.18-b).



(a) enveloppée totalement



(b) Partiellement enveloppé

Figure.2.17. Confinement de colonnes [36]

- Les colonnes et poteaux en B.A peuvent aussi être renforcés en utilisant des chemises en «PRF» sous forme de coquilles préfabriquées. Les coquilles sont fabriquées sous conditions contrôlées en utilisant la fibre en voile ou bandes avec l'imprégnation de résine effectuée avant l'installation. Elles peuvent être fabriquées en demi cercles ou demi rectangles (Nanni et Norris 1995[34], Ohno et al. 1997), en cercles avec une fente ou en rouleaux continus (Xiao et Ma 1997 [51]), afin qu'elles puissent être ouvertes et puissent être placés autour des colonnes (Fig.2.19).

Pour un confinement efficace, un contact total entre la colonne et la coquille en «PRF» 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 [51,34]. Ils ont suggérés que les colonnes carrés ou rectangulaires peuvent être renforcées en les reformant dans des colonnes circulaires ou elliptiques dans lesquelles une coquille préfabriquée en «PRF» est utilisée [51].



Figure.2.18. Chemisage par coquille préfabriquée en «PRF» (Monti 2003) [33].

Chacune des trois méthodes discutées au-dessus à ses avantages et ses inconvénients (Tableau 2.1).

Tableau 2. 1. Une comparaison des différentes méthodes de renforcement des colonnes.

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Stratification au contact	<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.
Enroulement filamenteux	<ul style="list-style-type: none"> - Un contrôle amélioré de la qualité. - Une main d'œuvre réduite sur chantier. 	<ul style="list-style-type: none"> - Moins de flexibilité d'adaptation avec les différentes formes de colonnes.

		- Exige un équipement spécial
Coquille préfabriquée	- 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

En général le «PRF» avec une stratification au contact, paraît être la méthode la plus populaire car elle possède des avantages pratiques tels que la flexibilité et la facilité de mise en œuvre. Le filament enroulé ressemble à la première méthode car les deux impliquent un processus de stratification directe [46].

2.2.7. Domaines d'application des composites dans le Génie Civil

L'objectif du renforcement/réparation par des matériaux composites est de rendre à l'ouvrage existant son état structurel initial et d'accroître sa capacité. Ce type de réhabilitation permet d'éviter la pose d'aciers en milieu agressif et également de conserver la section hydraulique de l'ouvrage, contrairement à la technique de mise en place d'un chemisage en béton projeté armé d'une épaisseur importante (6 à 8 cm) avec risque de corrosion des armatures. En outre les durées de remise en service de l'ouvrage sont diminuées [32].

Les matériaux composites sont habituellement employés pour la réparation ou le renforcement d'ouvrages. Le choix du renfort utilisé pour le composite se porte généralement sur les fibres de carbone puisqu'elles présentent une bonne résistance à la traction et à la compression, et un module d'élasticité assez élevé [47]. Les renforcements des éléments structuraux par la fibre de carbone s'appliquent à des structures en béton armé ou précontraint, en bois, en maçonnerie de briques ou encore aux maçonneries de pierres. Les domaines d'application des matériaux composites sont:

- Accroissement de la résistance des structures aux moments de flexion



Figure.2.19. Mise en place des lamelles sur une poutre [47].

-Accroissement de la résistance à l'effort tranchant



Figure.2.20. Mise en place d'équerres de renforcement sur une poutre en T [47]-

Renforcement de piles et poteaux



Fig.2.21. Mise en place de lamelles de carbone autour d'un poteau [47]

- **Accroissement de la résistance de parois en briques aux efforts sismiques**



Figure.2.22. Mise en place des lamelles sur un mur en briques [47]

- **Accroissement de la rigidité des structures en bois**



Figure. 2.23. Mise en place des lamelles sur une structure bois [47]

- Accroissement de la charge ultime d'effondrement



Figure.2.24. Mise en place des lamelles sur une coupole [47]

-Augmentation de la charge d'apparition de la première fissuration et la charge à la rupture



Figure.2.25. Mise en place des tissus de carbone sur des voûtes [47]

-Adaptabilité et gain de charge



Figure.2.26. Mise en place des lamelles sur des ovoïdes en béton armé Val-de-Marne (94)
[32]

2.3. Conclusion

La fissuration est le symptôme le plus fréquent de la dégradation des ouvrages en béton armé, mais la seule observation visuelle des fissures rend difficile le diagnostic. indépendamment de l'observation de la fissuration, reflet de la dégradation, la question essentielle qui se pose est de savoir à partir de quand la dégradation a une influence sur le comportement mécanique de la structure. Cela revient à se demander à quel moment une réparation doit être envisagée et quelle sera son ampleur. Dès que la capacité portante et la stabilité de l'ouvrage sont menacées, ces méthodes ne sont pas suffisantes. Des méthodes structurales doivent alors être envisagées. Celles-ci ont pour but de réparer et / ou de renforcer l'ouvrage. La réparation vise à compenser les pertes en rigidités, en résistance et ainsi redonner à la structure sa capacité portante originelle. Un renforcement consiste plutôt à consolider, à augmenter la capacité portante d'un élément et ainsi améliorer les performances et la durabilité de l'ouvrage.

Vu que les matériaux composites aient une grande flexibilité en s'adaptant aux formes géométriques les plus complexes des éléments renforcés, et pour leur légèreté par rapport aux aciers, leur facilités de manutention, de transport et de mise en œuvre sur site, ainsi que leurs résistance mécanique assez importante que les autres moyens de renforcements.

Ces multiples avantages, mécanique et physico-chimique permet l'utilisation des matériaux composites comme méthode de renforcement et de réhabilitation des structures en béton armé, l'application de tissus ou lamelles en PRFC (polymère renforcé en fibre de

carbone) est une alternative intéressante aux méthodes de réparation conventionnelle. C'est pour cette raison que le choix de renforcement à l'aide de matériaux composites (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone) de l'élément à renforcer dont a fait l'objet de cette étude est jugé favorable.

CHAPITRE 3

GENERALITES SUR LES

MATERIAUX

COMPOSITES

3. 1. Généralités sur les matériaux composites

3. 1. 1. Introduction :

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux ou plus de nature différente; ce complément permet d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composantes prises séparément.

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 part 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.

3. 1. 2. Revue des différents renforts disponibles :

Les principales fibres utilisées sont : Fibre de Carbone ; Fibre de Kevlar ; Fibre de Bore et Fibre de Verre [28].

3. 1. 2. 1. Les fibres de carbone :

Suivant les conditions de fabrication, il existe toute une variété de fibres de carbone. Mais, actuellement trois sortes sont commercialisées :

- 1- Les fibres haute résistance classique (types : As4, As6, T300 et X635) ;
- 2- Les fibres à haute résistance module intermédiaire (types : IM6, X636);
- 3- Les fibres à haut module (types : M40 et HM5).

D'un fabricant à l'autre, les propriétés mécaniques varient suivant les propriétés physiques et mécaniques moyennes. Elles sont données dans le tableau 3. 1:

Tableau 3. 1 : Propriétés des fibres de carbone [77]

Propriétés en traction	HR	IM	HM		
R_t (MPa)	3000 à	4000 à	47000 à	2000 à	1100 à
	5000	4500	52000	2500	2000
E_{oT} (MPa)	220000 à	235000 à	275000 à	350000 à	450000 à
	240000	250000	300000	400000	500000
A_R (%)	1.2 à 1.5	1.6 à 1.8	1.4 à 1.6	0.5 à 0.7	0.3 à 0.5
Masse volumique (g / cm ³)	1.75 à 1.8	1.75 à 1.8	1.7 à 1.8	1.8 à	1.9 à
				1.85	1.95

R_T , E_{oT} et A_R sont respectivement la résistance à la rupture; le module de Young et l'allongement à la rupture.

Une particularité importante de ces fibres est leur coefficient de dilatation thermique négatif ou quasi nul dans le sens de la fibre, c'est-à-dire que les fibres se raccourcissent quand on les chauffe et s'allongent quand on les refroidit.

3. 1. 2. 2. Les fibres de Kevlar :

Aromatique (les aramides). Actuellement, il existe deux types de produits : les fibres de Kevlar 49 et les fibres de Kevlar 29. Les premiers sont principalement utilisés pour la confection des composites, alors que les autres entrent surtout dans la constitution des cordes, cordages et câbles.

Les propriétés physiques et mécaniques de ces deux types de fibres sont représentées Les fibres de Kevlar sont des fibres synthétiques à base de polyamide dans(le tableau 3.2)

Tableau3. 2 : Propriétés des fibres de Kevlar [28]

Propriétés en traction	Kevlar 49	Kevlar 29
R_t (MPa)	3000	2700
E_{oT} (MPa)	120000 à 130000	60000
A_R (%)	2.1	4
Masse volumique (g / cm^3)	1.45	1.44

Du point de vu dilatation, le Kevlar présente la même particularité dans le sens de fibres que celle du carbone.

3. 1. 2. 3. Les fibres de Verre :

Il existe une multitude de fibres de verre dont les propriétés dépendent de leur composition. Actuellement, trois types de fibres de verre sont commercialisés sous forme de files. Ce sont les variétés E, S et R. Ces deux derniers sont très voisines (l'une est Américaine et l'autre est Française).

Les propriétés des ces fibres sont présentées dans (le tableau 3. 3)

Tableau 3. 3 : Propriétés des fibres de Verre [28]

Propriétés en traction	Verre E	Verre R	Verre S
R_t (MPa)	3400	4400	4900
E_{oT} (MPa)	73000	86000	87000
A_R (%)	4.9	5.2	-----
Masse volumique (g / cm^3)	2.54	2.55	2.54

3. 1. 3. Notion sur les matrices :

Actuellement, on distingue deux catégories de matrices: les matrices organiques (résines synthétiques) et les matrices métalliques [28].

3. 1. 3. 1. Les matrices organiques :

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

3. 1. 3. 2. Résines thermodurcissables :

Les résines thermodurcissables sont employées comme matrice des matériaux composites structuraux. Comme leur nom le laisse indiquer, ces produits durcissent après un cycle de chauffage appelé « cycle de polymérisation ». A l'issue de celui-ci, le matériau est un solide relativement rigide qui ne fond pas et ne se ramollit pas en température.

De ce fait, ils ne peuvent être mis en forme qu'une seule fois et ceci avant qu'ils ne durcissent, donc avant l'accomplissement du cycle de polymérisation.

Les résines thermodurcissables les plus répandues sont les polyesters, les époxydes, les polyamides et les phénoliques. Le tableau 3. 4 présente les propriétés physiques et mécaniques de ces résines après polymérisation.

Tableau 3. 4 : Propriétés des Résines thermodurcissables [28]

Propriétés en traction	Polyester	Epoxyde	Polyamide	Phénolique	Silicone
E_{oT} (MPa)	30 à 90	30 à 100	Environ 90	20 à 60	20 à 60
A_R (%)	2000 à 3000	2500 à 4000	Environ 3000	1000 à 5000	Environ 3000
Densité (g / cm ³)	1.1 à 1.3	1.1 à 1.3	Environ 1.3	1.2 à 1.4	1 à 1.1

3. 1. 3. 3. Résines thermoplastiques :

Les résines thermoplastiques chauffées, elles deviennent facilement déformables. Lorsqu'on les soumet à des gradients de température, elles commencent par se ramollir puis elles

fondent. De ce fait, leur utilisation en température est limitée par leurs mises en œuvre qui est grandement facile. Les variétés qui pourraient être appliquées sont: les poly sulfones, les polyarylsulfones, les polycarbonates et le nylon polyester thermoplastique.

3. 1. 3. 4. Les matrices métalliques :

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

3. 1. 4. Problèmes liés à l'utilisation des matériaux composites dans le génie civil :

3. 1. 4. 1. Introduction :

Depuis les premières applications des composites en génie civil, qui remontent au début des années 1980, et avec le développement des différents procédés et techniques de mise en œuvre, l'utilisation des composites a largement intéressé les laboratoires de recherche et les organismes industriels. Cependant, et malgré les nombreux avantages qu'offrent les matériaux composites, (propriétés mécaniques élevées, poids faible, résistance à la corrosion, etc.), leurs adaptations aux applications de renforcement révèlent de nombreux problèmes. Ces problèmes peuvent être liés directement à la mécanique des composites (matériaux hétérogènes et anisotropes) qui restent toujours un sujet de recherche, ou encore les problèmes liés à la structure renforcées (décollement, durabilité, etc.).

3. 1. 4. 2. Résistance des matériaux composites :

En général, le composite est formulé pour satisfaire à des critères de résistances, de rigidité ou bien de tenue à l'action de l'environnement. Les propriétés finales dépendent des propriétés élémentaires de chaque constituant (figure 3. 1). L'évaluation des propriétés des matériaux composites se fait à différentes échelles. Il s'agit d'une approche multi- échelles : celle de la fibre élémentaire, du pli élémentaire puis du composite.

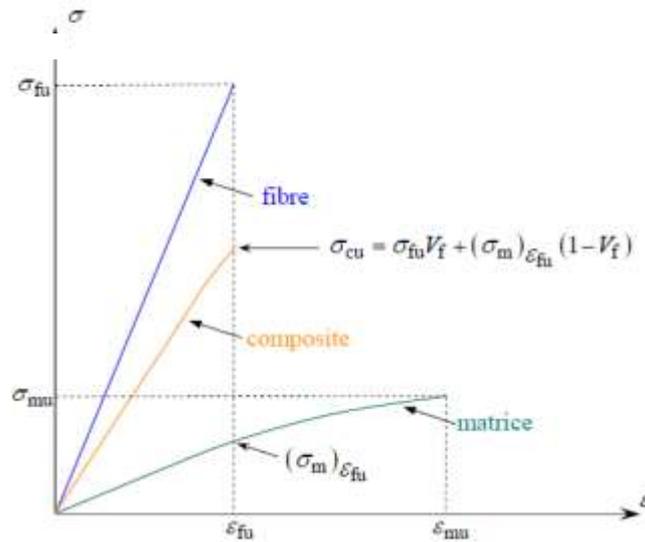


Figure 3. 1 : relation contrainte déformation en traction pour les différents composants [28]

3. 1. 4. 3. Elasticité à différentes échelles :

- A l'échelle de la fibre :

Expérimentalement, il a été montré [28,48] que la résistance moyenne des fibres diminue au fur et à mesure que sa longueur augmente.

- A l'échelle du pli élémentaire :

A l'échelle du pli élémentaire, le matériau composite a deux directions privilégiées (figure 3. 2) : la direction longitudinale (L) et la direction transversale (T). Dans un matériau composite unidirectionnel, les fibres sont le plus souvent réparties d'une manière aléatoire, plutôt que suivant un arrangement régulier. Il n'existe pas qu'une seule possibilité d'arrangement des fibres mais une infinité de possibilités [28,42].

Des expressions simplifiées et pratiques des modules peuvent être obtenues en faisant une approche simplifiée du comportement mécanique de la cellule élémentaire du matériau composite unidirectionnel (J. M. Berthelot, 1999) [28].

Si nous considérons un composite constitué de deux composants: une résine de caractéristiques E_m et ν_m et des fibres longues unidirectionnelles considérées isotropes et de caractéristiques E_f et ν_f , le taux volumique de fibres dans la résine est noté V_f .

Le matériau ainsi constitué est isotrope transverse dans la mesure où l'on observe une unique différence entre les caractéristiques selon les directions L et T.

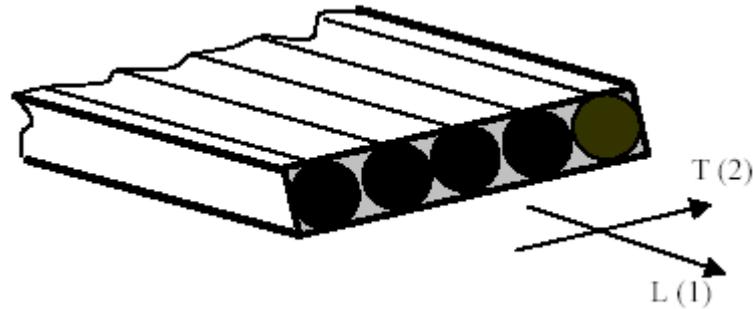


Figure 3. 2 : Illustration d'un renfort fibreux unidirectionnel

Il existe des formules simplifiées qui permettent la prédiction de ces coefficients à partir des caractéristiques des constituants. Ces lois simplifiées sont connues sous le nom de lois des mélanges dans le cas des unidirectionnels. Ces lois de mélange s'inscrivent dans le concept d'homogénéisation des caractéristiques de matériaux multi-phasiques ou hétérogènes (les composites notamment). Ces lois trouvent de nombreuses validations dans la littérature scientifique. Elles sont nombreuses et s'adaptent en fonction du type de constituant, du taux de fibre ou encore de l'arrangement des fibres dans la résine.

Un exemple de formule simplifiée est défini par les expressions suivantes, des caractéristique du mélange renfort – matrice [28]:

- Teneur en masse de renfort : $M_{fib} = (\text{masse de renfort}) / (\text{masse total})$
- Teneur en masse de matrice : $M_m = (\text{masse de matrice}) / (\text{masse total})$

$$M_{fib} + M_m = 1 \quad (3-1)$$

- Teneur en volume de renfort : $V_{fib} = (\text{volume de renfort}) / (\text{volume total})$
- Teneur en volume de matrice : $V_m = (\text{volume de matrice}) / (\text{volume total})$

$$V_{fib} + V_m = 1 \quad (3-2)$$

La fraction volumique des fibres V_{fib} typique est de l'ordre de 0,60 – 0,65.

- Module d'élasticité du composite: $E_f = E_{fib}V_{fib} + E_mV_m$ (3-3)

- Résistance en traction du composite: $f_f = f_{fib}V_{fib} + f_mV_m$ (3-4)

- Coefficient de poisson du composite: $\nu_f = \nu_{fib}V_{fib} + \nu_mV_m$ (3-5)

où : E_f est le module d'Young du matériau composite dans la direction des fibres, E_{fib} le module d'Young des fibres, E_m le module d'Young de la matrice, V_{fib} la fraction volumique

des fibres, V_m la fraction volumique de la matrice, f_f la résistance en traction du matériau composite, f_{fib} la résistance en traction des fibres, f_m la résistance en traction de la matrice, ν_f est le coefficient de poisson du composite, ν_{fib} est le coefficient de poisson des fibres, ν_m est le coefficient de poisson de la matrice. La résistance et le module d'Young des fibres sont plus importants par rapport à ceux de la matrice, le comportement mécanique des matériaux composites est donc piloté par les propriétés mécaniques des fibres et la quantité de fibres (fraction volumique).

- **A l'échelle du composite multicouche :**

Concernant le multi - couche, les propriétés du composite dépendent de l'orientation de l'empilement des couches élémentaires. Plusieurs approches existent concernant les modules d'élasticité. Dans un premier temps, nous pouvons citer les travaux de [28] qui ont exprimé les rigidités de composite en considérant les modules de compression latérale des fibres et de la matrice ou en considérant le cisaillement transverse entre couches. Les développements de ces modèles prennent en considération des fibres de diamètre identiques réparties suivant un arrangement hexagonal.

[Berthelot J. M. 1999] précise que, lorsque le rapport largeur sur épaisseur est inférieur à 10, les effets d'empilement de couches restent négligeables sur le comportement mécanique du composite. Les contraintes et les déformations d'un multicouche sont liées par des matrices de souplesses ou de rigidité [28].

Pour caractériser la réponse mécanique des composites, la théorie de l'élasticité linéaire a été adaptée à ces nouveaux matériaux anisotropes et aux structures multicouches, c'est la théorie des plaques stratifiées. En revanche, la possibilité de prédire sa résistance n'est toujours pas parfaitement remplie en raison, notamment, de la forte anisotropie du composite et donc de la variation de sa résistance en fonction de la direction et du signe des contraintes. Généralement, on distingue trois mécanismes élémentaires d'endommagement dans un composite, soit la rupture de la fibre, la fissuration de la matrice et la décohésion de l'interface fibre- matrice (figure 3. 3) (Berthelot 1999) [28].

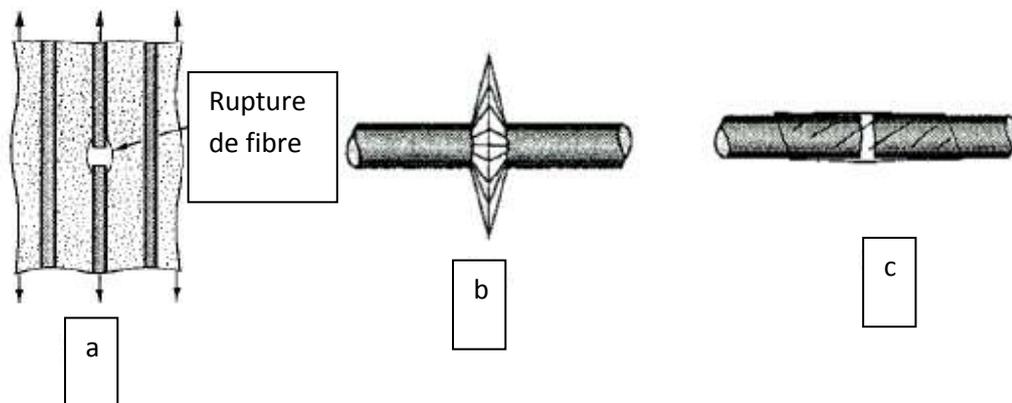


Figure 3. 3 : Modes de rupture des matériaux composites [28] :

a) rupture de la fibre, b) rupture de la matrice, c) rupture de l'interface fibre - matrice

3. 1. 4. 4. Adhésif :

Dans le cas d'une réparation d'une structure en béton armé par matériaux composite, il faut utiliser un adhésif pour coller la plaque composite sur la surface en béton. Un adhésif est nécessaire pour coller le matériau composite sur une surface, dont l'objectif est de transmettre les contrainte de cisaillement entre le béton et le composite. D'après le bulletin 14 de la FIB, les caractéristiques typiques d'un adhésif époxy avec une cure à froid sont les suivants :

Tableau 3. 5 : Caractéristiques typiques de l'adhésif d'époxy (FIB bulletin 14, 2001)

Densité (kg/ m ³)	1100 - 1700
Module d'Young (GPa)	0,50 - 20
Module d cisaillement (GPa)	0,80 - 8
Coefficient de Poisson	0,30 - 0,40
Résistance en traction (MPa)	9 - 30
Résistance à l'effort tranchant (MPa)	10 - 30
Résistance en compression (MPa)	55 - 110
Déformation en traction à la rupture (%)	0,50 - 5
Température de transition vitreuse (°C)	45 - 80

3. 2. Présentation de la théorie des plaques stratifiées :

Cette présentation est consacré au développement des équations qui décrivent la réponse élastique linéaire des composites stratifiées soumise à des charges dans le plan et en flexion.

Les couches individuelles sont supposées être homogènes, orthotropes, ou transversalement isotrope et dans un état de contraintes planes. Un stratifié type avec un système de coordonnées locales et globales est représenté dans la(figure 3 .4.)

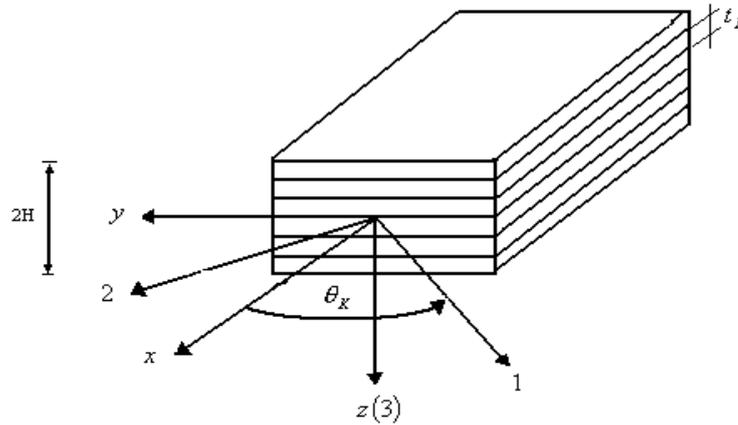


Figure 3.4 : composite stratifié

3. 2. 1. Notation :

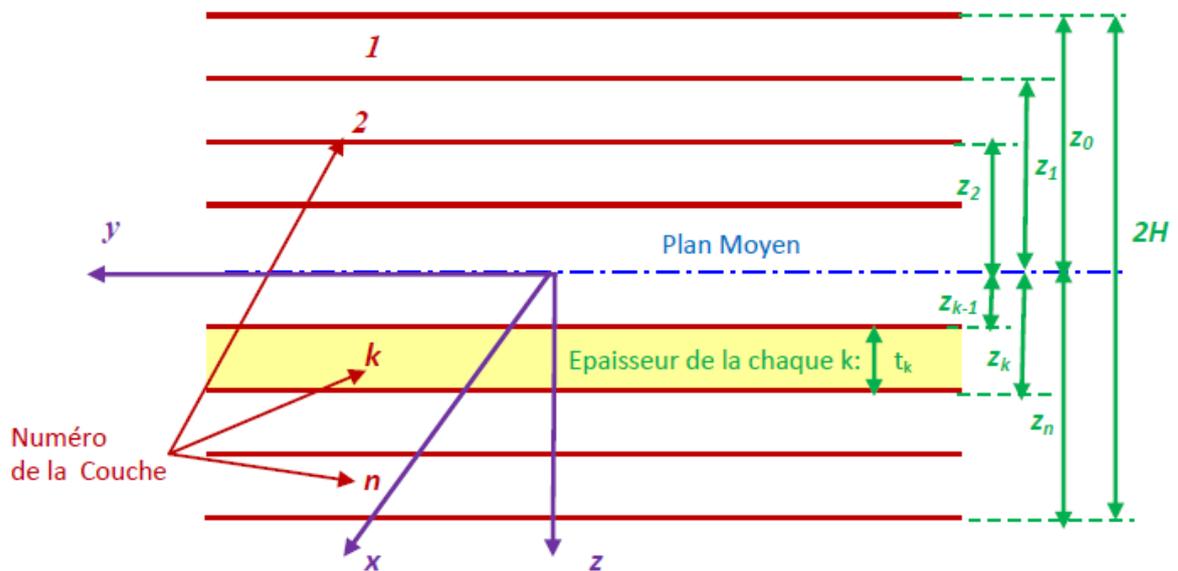


Figure 3.5: Les coordonnées d'un stratifié

Pour le stratifié présenté dans la figure 3.5, nous prenons le système de coordonnées globales (X, Y, Z) avec l'axe Z perpendiculaire au plan du stratifié et est positif vers le bas. L'origine du système de coordonnées est localisée dans le plan médium du stratifié.

Le stratifié a « N couches » (plis) numérotées du haut vers le bas ; chaque couche a des orientations différentes des fibres notées θ_k . Comme c'est indiqué dans la figure 3. 5, l'épaisseur de chaque couche est $t_k=z_k-z_{k-1}$ et l'épaisseur totale est « 2H ». (Le tableau 3. 6) montre les notations décrivant les séquences d'empilement d'un stratifié.

Tableau 3. 6 : Exemple des notations des stratifiés

Séquences des couches	Stratifié	Couches
8 couches @ 0°	[0 ₈]	8
2@ +45, 2@ -45 symétriques	[45 ₂ / -45 ₂] _s	8
+45 / -45 / +45 / -45 symétriques	[(±45) ₂] _s	8
+45 / - 45 / 0 / 90 symétriques	[±45 / 0 / 90] _s	8
50 groupes [±45 / 0 / 90] symétriques	[(±45 / 0 / 90) ₅₀] _s	400
+θ , -θ symétriques	[±θ] _s	4

3. 2. 2. Hypothèses de la théorie des stratifiés :

Les hypothèses suivantes sont fondamentales pour la théorie des plaques stratifiées [28] :

- L'interface entre les couches est parfaite (Continuité des déplacements et des déformations) ;
- Chaque couche est un matériau homogène avec des propriétés effectives connues ;
- Les propriétés de la couche individuelle peuvent être isotropes, orthotropes ou transversalement isotropes ;
- Chaque couche est dans un état de contrainte plane ;

- Le stratifié se déforme selon les hypothèses de « Kirchhoff - Love » pour la flexion et la traction des plaques minces :
 - La normale au plan médium reste droite et est normale au plan médium déformé après déformation ;
 - Les normales au plan médium ne changent pas de longueur.

3. 2. 3. Relation déformation – déplacement :

La première hypothèse de « Kirchhoff - Love » exige que les déformations de cisaillement γ_{zx} et γ_{zy} soient nulles.

La deuxième hypothèse de « Kirchhoff - Love » exige que le déplacement transversal suivant l'axe « Z » du plan médium est une fonction de x et y seulement c'est-à-dire $w = w(x, y)$

(La figure 3. 6) illustre un schéma du plan X - Z d'une surface moyenne déformée.

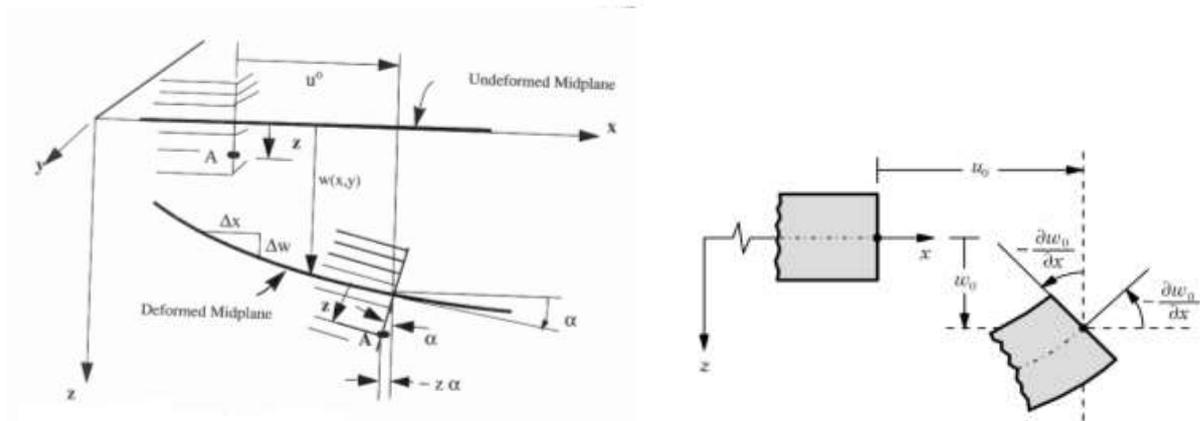


Figure 3. 6 : Plan médium dans un stratifié déformé

Supposons que les déplacements sont petits, la pente α de la surface déformée sera aussi

petite ce qui implique que :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\partial w}{\partial x} \approx \alpha \quad (3-6)$$

Le déplacement total « u » du point A (figure 3.6) peut être écrit comme la somme du déplacement du plan moyen u^0 plus le déplacement dû à la rotation α de la normale au plan

moyen. Ainsi :

$$u = u^0 - z \operatorname{tg} \alpha = u^0 - z \alpha = u^0 - z \frac{\partial w}{\partial x} \quad (3-7)$$

$$\text{De la même façon que pour le plan Y- Z, nous aurons : } v = v^0 - z \frac{\partial w}{\partial y} \quad (3-8)$$

v^0 : Le déplacement du plan médium suivant l'axe Y.

Puisque les normales ne changent pas de longueurs, le déplacement transversal w est indépendant de « z » et peut être écrit sous la forme suivante : $w(x, y) = w^0(x, y)$ (3-9)

Où : l'indice supérieur « 0 » représente le plan médium.

Les équations déformations- déplacements peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u^0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \varepsilon_x^0 + z k_x \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v^0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \varepsilon_y^0 + z k_y \\ \gamma_{xy} &= \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{\partial u^0}{\partial y} - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial v^0}{\partial x} = \gamma_{xy}^0 + z k_{xy} \end{aligned} \quad (3-10)$$

Où les courbures $\{k\}$ sont définies comme suit :

$$k_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad k_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad k_{xy} = -2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (3-11)$$

En combinant les équations (3-10) et (3-11) nous aurons :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3-12)$$

$$\text{Ou plus simplement : } \{\varepsilon_x\} = \{\varepsilon^0\}_x + z \{k\}_x \quad (3-13)$$

La dernière équation exprime les déformations totales $\{\varepsilon_x\}$ à chaque cotes « z » dans le stratifié en fonction des déformations au niveau du plan médium $\{\varepsilon^0\}_x$ et les courbures $\{k\}_x$, c'est l'équation fondamentale de la théorie des stratifiés.

3. 2. 4. Les contraintes :

L'expression des contraintes peut être maintenant déterminée en écrivant la relation qui existe entre ces dernières et les déformations et par l'utilisation de l'équation (3-13):

$$\{\sigma\}_x = [\bar{Q}]^k \{\varepsilon\}_x \quad (3-14)$$

Où : $[\bar{Q}]^k$ matrice de rigidité réduite transformée du $k^{\text{ième}}$ pli correspondant à la cote z .

Remarque : Un point très important dans l'utilisation des équations constitutives des stratifiés est que la matrice transformée $[\bar{Q}]^k$ varie avec l'orientation des fibres de chaque couche

A partir des équations (3-13) et (3-14), nous pouvons écrire :

$$\{\sigma\}^k = [\bar{Q}]^k \{\varepsilon^0\} + [\bar{Q}]^k z \{k\} \quad (3-15)$$

3. 2. 5. Les Forces par unité de longueur :

Les forces par unité de longueur $\{N_x, N_y, N_{xy}\}$ (figure 3. 7) sont définies comme suit :

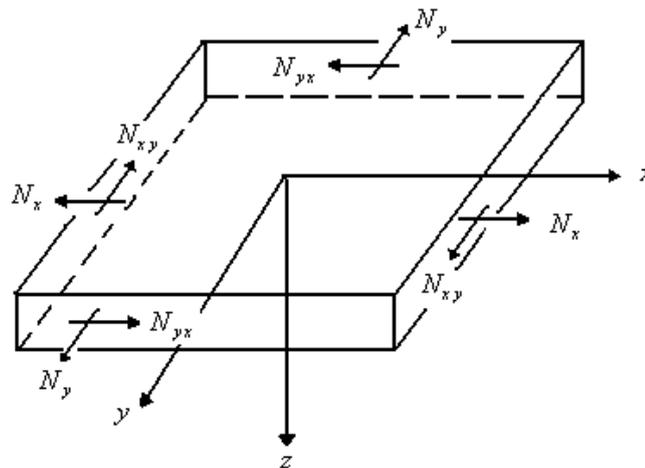


Figure 3.7 : Forces par unité de longueur

$$\begin{aligned}
 N_x &= \int_{-H}^{+H} \sigma_x dz \\
 N_y &= \int_{-H}^{+H} \sigma_y dz \\
 N_{xy} &= \int_{-H}^{+H} \tau_{xy} dz
 \end{aligned} \tag{3-16}$$

Les trois équations peuvent être écrites sous la forme condensée : $\{N\} = \int_{-H}^{+H} \{\sigma\} dz$ (3-17)

A partir des équations (3-15) et (3-16), nous aurons :

$$\{N\} = \int_{-H}^{+H} [\bar{Q}]^k \{\varepsilon^0\} dz + \int_{-H}^{+H} [\bar{Q}]^k \{k\} z dz \tag{3-18}$$

Ou bien sous une autre forme : $\{N\} = \sum_{k=1}^n \left(\int_{z_{k-1}}^{z_k} [\bar{Q}] dz \right) \{\varepsilon^0\} + \sum_{k=1}^n \left(\int_{z_{k-1}}^{z_k} [\bar{Q}]^k z dz \right) \{k\}$ (3-19)

Cette dernière équation peut être écrite sous la forme suivante :

$$\{N\} = [A] \{\varepsilon^0\} + [B] \{k\} \tag{3-20}$$

Où :

$$[A] = \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]^k (z_k - z_{k-1}) \tag{3-21}$$

$$[B] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]^k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \tag{3-22}$$

Remarque : La matrice $[\bar{Q}]^k$ est constante à travers chaque couche mais peut être différente d'une couche à une autre.

L'équation (3-20) relie les forces de membrane par unité de longueur aux déformations du plan médium $\{\varepsilon^0\}$, et les courbures du stratifié $\{k\}$ par les matrices $[A]$ et $[B]$. La matrice $[A]$ représente « la matrice de membrane » et la matrice $[B]$ représente « la matrice de couplage membrane - flexion ».

3. 2. 6. Moments par unité de longueur :

On définit les moments par unité de longueur $\{M_x, M_y, M_z\}$ (figure 3.8) comme l'intégrale des forces « $\sigma_i z dz$ », ainsi :

$$M_x = \int_{-H}^{+H} \sigma_x z dz \quad M_y = \int_{-H}^{+H} \sigma_y z dz \quad M_{xy} = \int_{-H}^{+H} \tau_{xy} z dz \quad (3-23)$$

Ou bien sous une forme condensée :

$$\{M\} = \int_{-H}^{+H} \{\sigma\} z dz \quad (3-24)$$

Substituant l'équation (3-15) dans l'équation (3-24), nous aurons l'expression des moments par unité de longueur :

$$\{M\} = [B]\{\varepsilon^0\} + [D]\{k\} \quad (3-25)$$

Où la matrice de flexion est définie comme suit :

$$[D] = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]^k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (3-26)$$

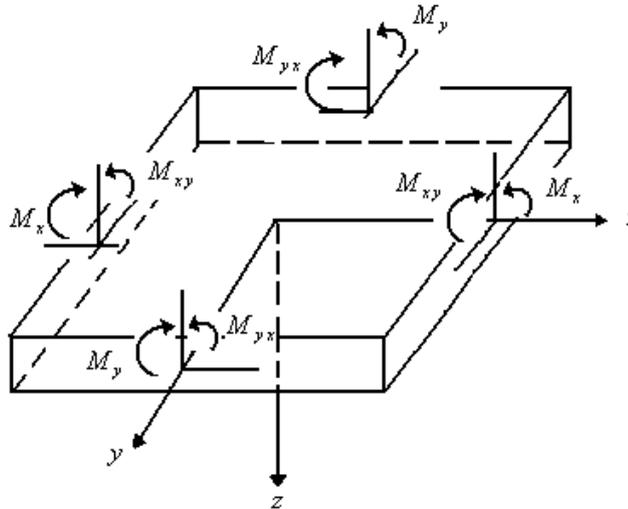


Figure 3.8 : Moments par unité de longueur

3. 2. 7. Relations constitutives du stratifié :

Les équations (3-20) et (3-25) peuvent être combinées pour donner l'équation fondamentale de la théorie des stratifiés :

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{Bmatrix} \quad (3-27)$$

Cette équation peut être écrite sous une forme plus détaillée comme suit :

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3-28)$$

Les équations (3-27) ou (3-28) montrent clairement le couplage de la réponse en flexion et de membrane du stratifié, illustrée par la matrice $[B]$. Si la matrice $[B]=[0]$, alors l'effet de membrane est découplé de l'effet de flexion.

L'équation (3-27) peut être inversée pour donner l'expression suivante:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \quad (3-29)$$

Reprenons les équations (3-20) et (3-25)

$$\{N\} = [A]\{\varepsilon^0\} + [B]\{k\} \quad (3-30)$$

$$\{M\} = [B]\{\varepsilon^0\} + [D]\{k\} \quad (3-31)$$

La résolution de l'équation (3-30) donne : $\{\varepsilon^0\} = [A]^{-1}\{N\} - [A]^{-1}[B]\{k\}$ (3-32)

En substituant l'équation (3-32) dans l'équation (3-31), nous aurons :

$$\{M\} = [B][A]^{-1}\{N\} + ([D] - [B][A]^{-1}[B])\{k\} \quad (3-33)$$

Les équations (3-32) et (3-33) peuvent être écrites sous une autre forme :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A^* & B^* \\ C^* & D^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ k \end{Bmatrix} \quad (3-34)$$

Où :

$$\begin{aligned}
 [A^*] &= [A]^{-1} \\
 [B^*] &= [A]^{-1}[B] \\
 [C^*] &= [B][A]^{-1} \\
 [D^*] &= [D] - [B][A]^{-1}[B]
 \end{aligned} \tag{3-35}$$

L'équation (3-34) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\{\varepsilon^0\} = [A^*]\{N\} + [B^*]\{k\} \tag{3-36}$$

$$\{M\} = [C^*]\{N\} + [D^*]\{k\} \tag{3-37}$$

A partir de l'équation (3-37), nous pouvons déterminer l'expression de la courbure $\{k\}$

$$\{K\} = -[D^*]^{-1}[C^*]\{N\} + [D^*]^{-1}\{M\} \tag{3-38}$$

Substituant l'équation (3-38) dans l'équation (3-36)

$$\{\varepsilon^0\} = ([A^*] - [B^*][D^*]^{-1}[C^*])\{N\} + [B^*][D^*]^{-1}\{M\} \tag{3-39}$$

Les équations (3-39) et (3-38) peuvent être écrites :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \tag{3-40}$$

Où :

$$\begin{aligned}
 [A'] &= [A^*] - [B^*][D^*]^{-1}[C^*] \\
 [B'] &= [B^*][D^*]^{-1} \\
 [C'] &= -[D^*]^{-1}[C^*] \\
 [D'] &= [D^*]^{-1}
 \end{aligned} \tag{3-41}$$

A partir des équations (3-41) et (3-35), nous aurons :

$$\begin{aligned}
 [A'] &= [A]^{-1} + [A]^{-1}[B][D^*]^{-1}[B][A]^{-1} \\
 [B'] &= -[A]^{-1}[B][D^*]^{-1} \\
 [C'] &= -[D^*]^{-1}[C^*] \\
 [D'] &= [D^*]^{-1}
 \end{aligned} \tag{3-42}$$

A partir des expressions de $[B']$ et $[C']$ (3-42), nous remarquons que :

$$[C'] = [B']^T \quad (3-43)$$

Ainsi, les équations (3-29) et (3-40) peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ B'^T & D' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \quad (3-44)$$

Ou bien sous une forme plus détaillée :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}' & A_{12}' & A_{16}' & B_{11}' & B_{12}' & B_{16}' \\ A_{12}' & A_{22}' & A_{26}' & B_{12}' & B_{22}' & B_{26}' \\ A_{16}' & A_{26}' & A_{66}' & B_{16}' & B_{26}' & B_{66}' \\ B_{11}' & B_{12}' & B_{16}' & D_{11}' & D_{12}' & D_{16}' \\ B_{12}' & B_{22}' & B_{26}' & D_{12}' & D_{22}' & D_{26}' \\ B_{16}' & B_{26}' & B_{66}' & D_{16}' & D_{26}' & D_{66}' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3-45)$$

3. 2. 8. Stratifiés symétriques :

Pour un stratifié symétrique, la matrice de couplage $[B]$ est nulle. Cela peut être montré en considérant la contribution de deux couches identiques p et q (même matériau, même orientation des fibres et même épaisseur). Ces deux couches sont symétriques par rapport au plan médium (figure 3.9).

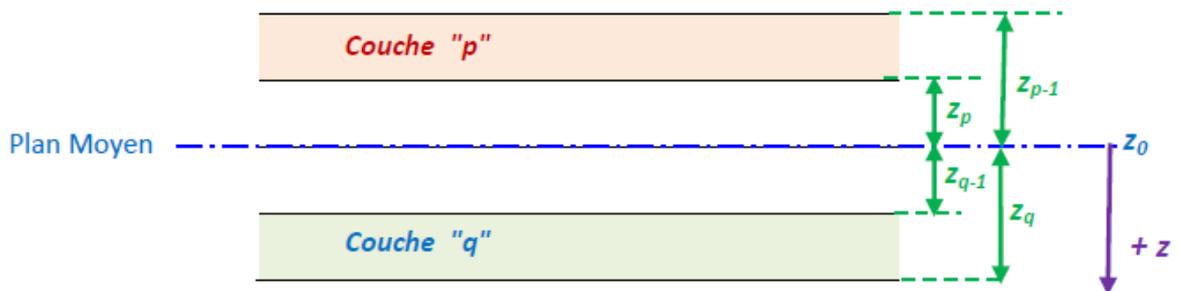


Figure 3.9. Couches symétriques

Puisque les deux couches sont de même matériau et ils ont la même orientation de fibres (par rapport au repère global) nous pouvons écrire que :

$$\bar{Q}_{ij(p)} = \bar{Q}_{ij(q)} \quad (3-46)$$

Vu la symétrie des deux couches, nous aurons :

$$z_p = z_{q-1} \quad (3-47)$$

$$z_{p-1} = z_q \quad (3-48)$$

A partir de la définition de la matrice $[B]$ (3-22), nous aurons :

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \bar{Q}_{ij(p)} (z_p^2 - z_{p-1}^2) + \frac{1}{2} \bar{Q}_{ij(q)} (z_q^2 - z_{q-1}^2) \quad (3-49)$$

Par la substitution de l'équation (3-46) dans l'équation (3-49), nous obtenons :

$$B_{ij(p+q)} = \frac{1}{2} \bar{Q}_{ij(p)} [z_p^2 - z_{p-1}^2 + z_{p-1}^2 - z_p^2] = 0 \quad (3-50)$$

Ainsi, la contribution de n'importe quelle deux couches est nulle pour tous les termes B_{ij} .

Donc, la matrice $[B]$ est nulle pour un stratifié symétrique. Par contre, la contribution des termes A_{ij} et D_{ij} pour deux couches symétriques est non nulle c'est-à-dire :

$$A_{ij(p+q)} = 2\bar{Q}_{ij} (z_p - z_{p-1}) = 2\bar{Q}_{ij} (t_p) \neq 0 \quad (3-51)$$

$$D_{ij(p+q)} = \frac{2}{3} \bar{Q}_{ij} (z_p^3 - z_{p-1}^3) \neq 0 \quad (3-52)$$

Où : t_p est l'épaisseur de la couche p.

Les équations constitutives d'un stratifié symétriques sont :

$$\{N\} = [A] \{\varepsilon^0\} \quad (3-53)$$

$$\{M\} = [D] \{k\} \quad (3-54)$$

3. 3. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synoptique sur les matériaux composites. On s'est intéressé à ceux résultant de l'assemblage d'une matrice et d'un renfort se présentant sous forme de fibres. Cette présentation montre les caractères avantageux de ces matériaux à savoir légèreté et une grande résistance à la traction. Le plus souvent, les matériaux composites se présentent sous forme d'un empilement de couches donnant lieu à un stratifié, pour cela nous avons donc exposé dans ce chapitre les relations qui existent entre les composantes de déformation et celles de déplacement qui nous ont permis l'obtention de l'équation fondamentale de la théorie des stratifiés. A partir de cette dernière équation et en exprimant les forces et les moments par unité de longueur, les matrices de membrane, de flexion et de couplage ont été déterminées. Comme ce stratifié va être appliqué à la face de tension inférieure d'une poutre en béton dans le but de la renforcer, il est impératif d'étudier la zone de contact béton – composite appelée interface. Une investigation sur les différentes méthodes de renforcement et de réparation des poutres en béton armé par collage de matériaux composite et les théories de calcul des contraintes d'interface issues de la littérature ont été présentées en chapitre 2. En se basant sur la théorie des stratifiés exposée dans ce chapitre et l'approche de la compatibilité des déformations une nouvelle approche pour le calcul des contraintes au niveau de l'interface sera présentée dans ce qui suit.

CHAPITRE 4

METODE DE CALCUL DE

TYPE REGLEMENTAIRE

AUX ELU

4.1. Introduction

Une des applications les plus courantes des matériaux composites pour le renforcement/réparation des ouvrages en béton armé concerne les éléments structuraux structures soumises aux sollicitations de flexion ou celles d'effort tranchant.

Dans ce chapitre, on présente les équations estimant la résistance au moment fléchissant des poutres en béton armé réparées à l'aide des matériaux composites.

4.2. Comportement mécanique d'une section de poutre renforcée

La rupture par flexion peut se produire : par la plastification de l'armature tendue ou par compression du béton associée à la plastification de l'armature tendue (Fig.4.1). La rupture par cisaillement est due soit à: 1) la contrainte principale oblique, 2) la compression par cisaillement ou 3) la perte d'adhérence par cisaillement.

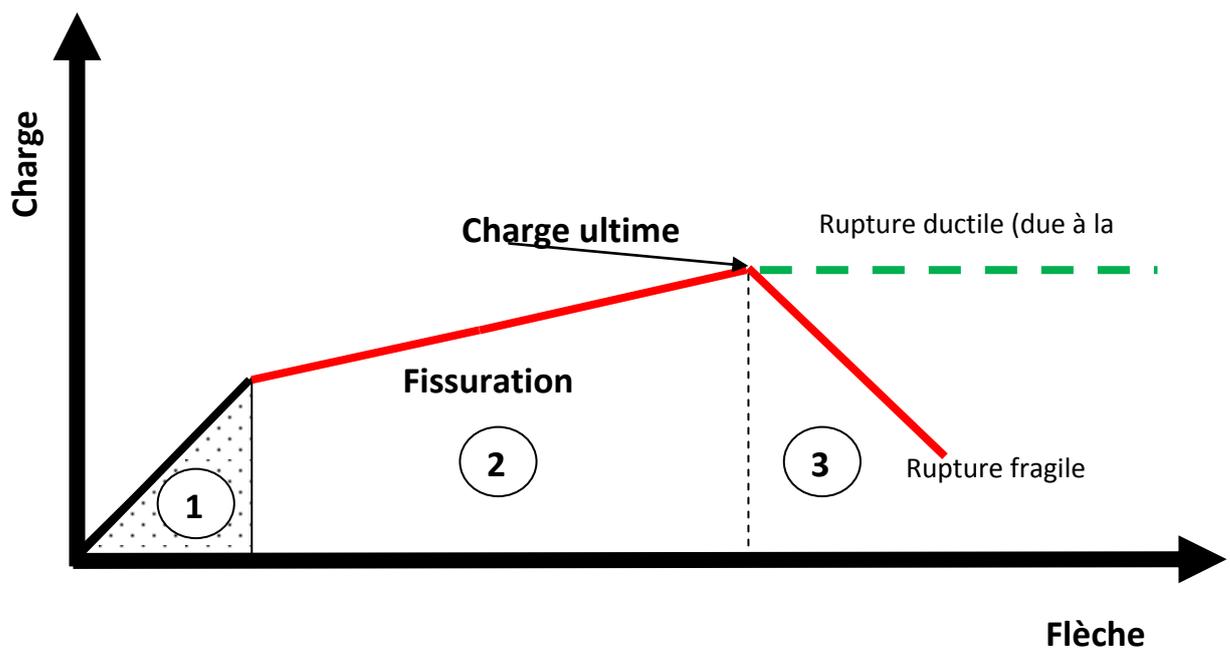


Figure.4.1. Phases de comportement d'une poutre en béton armé

Ces mécanismes de rupture dépendent de la résistance des matériaux, des dimensions de la structure et du type de chargement. La résistance à la flexion d'une poutre en béton armé est apportée principalement par l'armature tendue et les propriétés du béton. La résistance aux efforts tranchants est assurée par l'armature transversale (cadres) et les caractéristiques du béton.

Par ailleurs, la combinaison des matériaux composites comme renforcement de poutres en béton armé produit de nouveaux modes de rupture

D'après Buyukozturk et al. [10], Toutanji et al. [49], Gao bo et al. [20], Grace et al. [21], ces ruptures peuvent se situer à différentes parties de la poutre (Fig.4.2): (1) entre l'armature tendue et l'enrobage en béton, (2) dans l'enrobage en béton, (3) entre le béton et l'adhésif du composite, (4) entre l'adhésif et le tissu ou la plaque en composite, (5) dans l'adhésif et (6) dans le composite. Les mécanismes de rupture, dus au décollement, les plus observés sont la séparation d'enrobage en béton entre l'armature tendue et le béton et le décollement du composite soit à l'extrémité soit à mi-portée de la poutre.

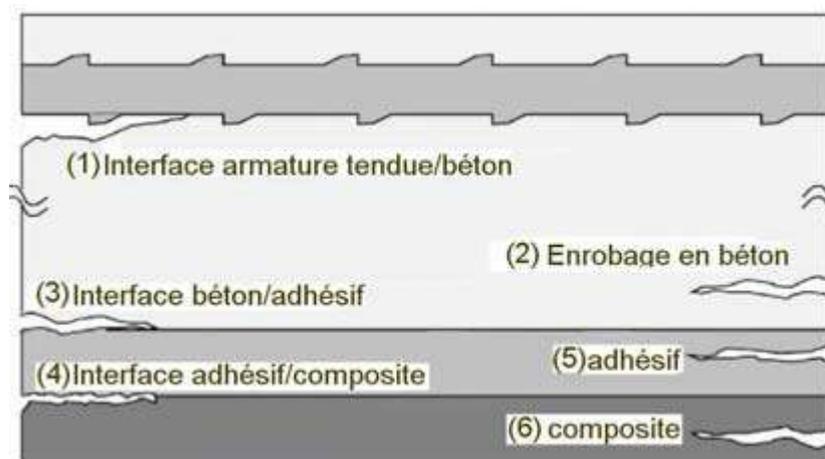


Figure.4.2. Différents types de décollement observés sur des éléments en BA renforcés par le collage d'une composite sur la face tendue.

Les mécanismes de rupture, dus au décollement, les plus observés sont la séparation d'enrobage en béton entre l'armature tendue et le béton et le décollement du composite soit à l'extrémité soit à mi-portée de la poutre. Ces modes de rupture proviennent de la concentration de contrainte de cisaillement dans la couche de la colle (la couche du béton de l'enrobage). La résistance à la contrainte de cisaillement de la colle est plus élevée que celle du béton, le décollement de tissu se produit donc toujours entre le béton et la colle [20]. Pour cette raison, sur le tissu décollé, il y a toujours des petits morceaux de béton (Fig.4.3).

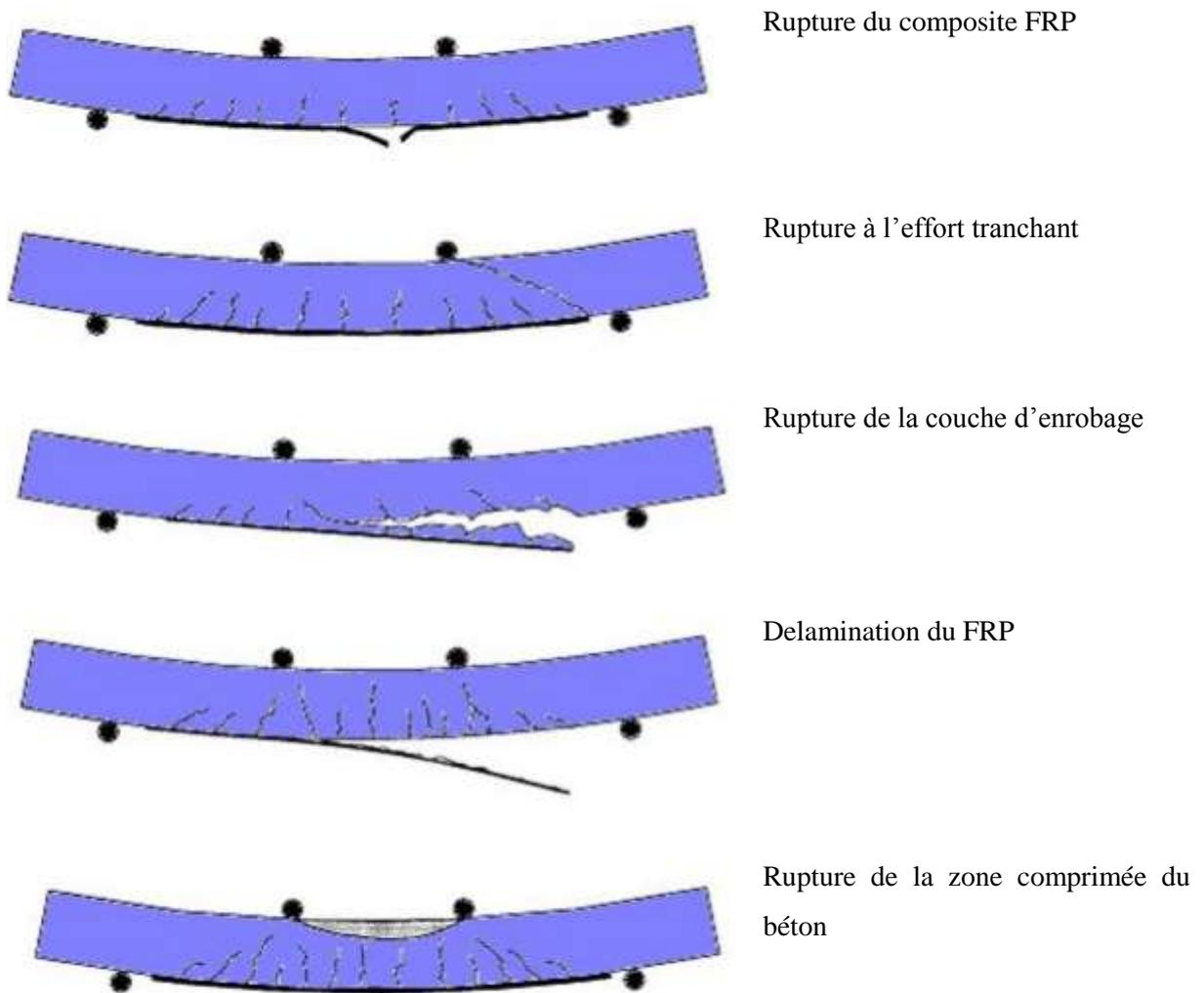


Figure.4.3. Différents modes de rupture des poutres Renforcées par les composites [20]

Plusieurs travaux expérimentaux ont été réalisés sur le renforcement des poutres par composites et le mode de rupture prédominant est souvent le décollement du renfort. Ce mode de rupture, connue par le peeling-off (Fig.4.4), a suscité beaucoup d'intérêt chez les chercheurs puisqu'il permet d'évaluer la capacité de transfert des charges entre le support en béton et le renfort composite.



Figure.4.4. Décollement du renfort

4.3. Calcul de moment résistant ultime

Cette section présente succinctement les méthodes de calcul de type réglementaire concernant les poutres réparées par matériaux composites sur la face tendue sous chargement de flexion aux ELU. L'approche de la Fédération Internationale du Béton [18] et de l'Association Française de Génie Civil (AFGC) [1] sont présentées.

4.3.1. Méthode FIB

La rupture des poutres renforcées provient soit:

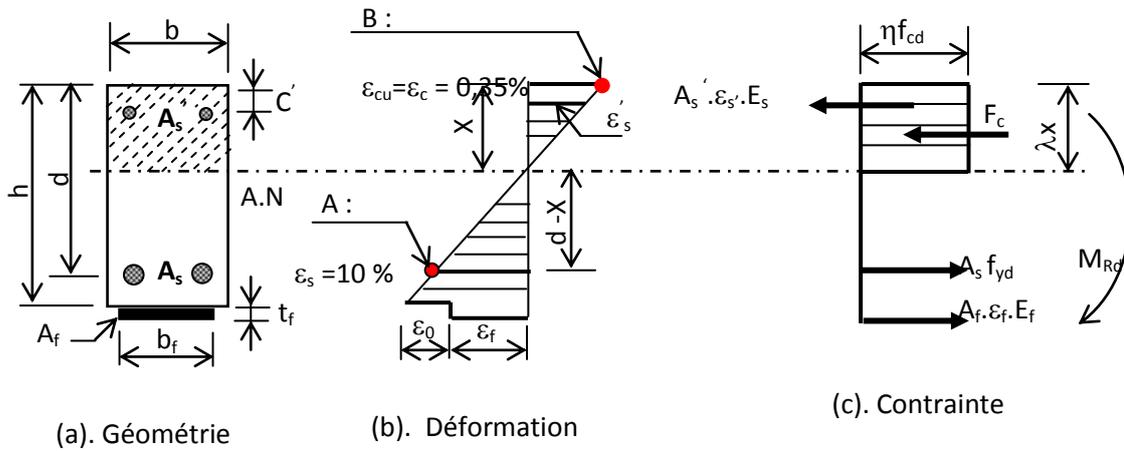
1. La plastification parfaite des armatures tendues associée à la rupture du béton comprimé, le composite étant encore intact.
2. La rupture prématurée due à la perte d'action composite, comme le décollement de tissu ou la séparation d'enrobage du béton, se produit assez fréquemment.

La méthode de calcul FIB [18] distingue ces deux cas.

4.3.1.1. Action composite parfaite

La position de l'axe neutre, les valeurs de déformation dans le béton comprimé ε_c et en fibre tendu ε_0 dans une poutre fissurées et non renforcée sont déterminées par une approche ELS.

Etant donnée la section transversale d'une poutre renforcée (Fig. 4.5).



(a). Géométrie

(b). Déformation

(c). Contrainte

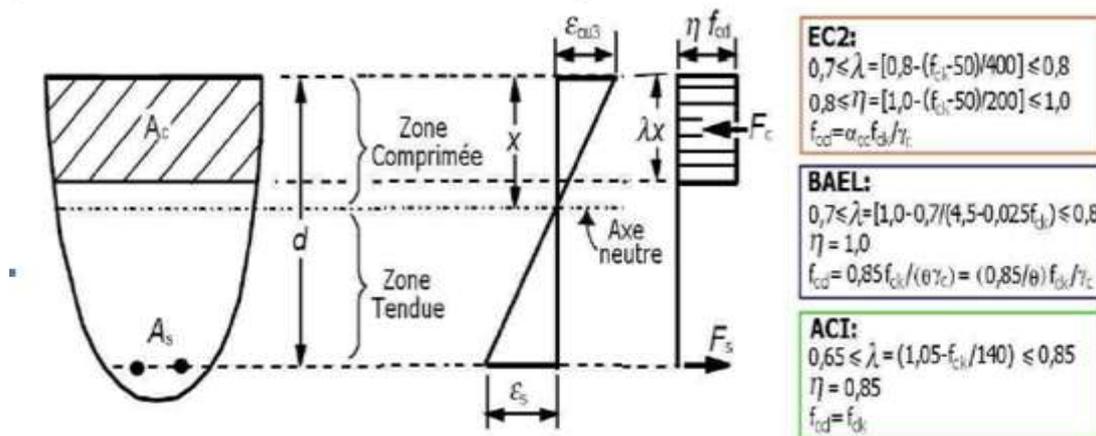


Figure.4.5.Section transversale d'une poutre en béton armé en flexion simple.

La déformation initiale ε_0 du composite s'écrit, avec h la hauteur de la poutre renforcée et x la hauteur de la zone comprimée :

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_c \frac{h - x}{x} \quad (4.1)$$

Pour calculer la résistance d'une poutre renforcée en action composite parfaite, il faut déterminer la position de l'axe neutre x_{en} utilisant la condition d'équilibre des forces dans la section (Fig. 4.5).

$$\eta f_{cd} \cdot bx + A'_s \cdot \varepsilon'_s \cdot E_s = A_s \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \quad (4.2)$$

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{cu} \frac{x - c'}{x} \text{ (Déformation des armatures comprimées)} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \text{ (Déformation du composite)} \quad (4.4)$$

et $E_s \cdot \varepsilon_s \leq f_{yd}$ avec f_{yd} = limite d'élasticité de calcul des armatures

La capacité d'une poutre renforcée au moment fléchissant est comme suit:

$$M_{Rd} = A_s \cdot E_s \cdot \varepsilon_s \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right) + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \left(h - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) + A'_s \cdot E_s \cdot \varepsilon'_s \left(\frac{\lambda \cdot x}{2} - c' \right) \quad (4.5)$$

La déformation des armatures tendues et celle du composite doivent vérifier les conditions suivantes (cf. formule 4.6):

- 1) les armatures tendues sont plastifiées,
- 2) la déformation du composite ne doit pas dépasser la valeur limite ε_{fud} .

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \\ \varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{d - x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fud} \end{array} \right. \quad (4.6)$$

4.3.1.2. Perte d'action composite

Pour une poutre réparée, la perte d'action composite provient du décollement du composite

dû aux fissures de flexion, du décollement aux extrémités du composite, du décollement dû à un défaut de planéité de la surface du béton et des fissures d'effort.

4.3.2. Méthode AFGC

Les hypothèses de calcul additionnelles à celles du béton armé sont énumérées ci-dessous :

-La résistance à la compression du composite est négligée

- Pour les composites, la contrainte est limitée à $f_{f,d} = \alpha_f \frac{f_f}{\gamma_{f,u}}$ à l'ELU,

où α_f est fixé à 0,65 pour prendre en compte les effets liés au vieillissement des matériaux organiques et la diminution de leurs caractéristiques mécaniques avec le temps

f_f : résistance à la traction du composite

$\gamma_{f,u} = 1,25$ pour les pultrudés carbone époxyde.

$\gamma_{f,u} = 1,6$ pour dans le cas des stratifiés in situ carbone-époxy

- l'allongement unitaire du renfort composite est limité à $\epsilon_{fu,d} = \text{Min}\{ f_{f,d}/E_f ; 0,85\% \}$,

En plus des pivots A et B du BAEL91, la notion de pivot D, qui correspond à l'atteinte de l'allongement ultime calculé du composite $\epsilon_{fu,d}$, est introduite dans ce calcul pour les poutres renforcées (Fig. 4.6).

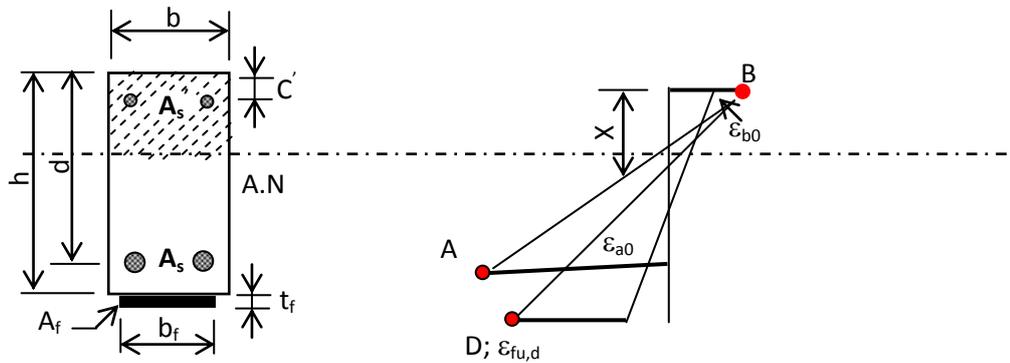


Figure.4.6. Diagramme des trois pivots [1].

1^{er} cas (pivot A ou B de la figure III. 10)

Le premier cas concerne la droite AB. En prenant $\frac{h-x}{d-x} = 1,10$, la condition à remplir est la suivante: $1,10 \cdot (1\% - \epsilon_{s0}) < \epsilon_{fu,d}$

L'expression du moment fléchissant résistant correspondant au diagramme de déformations AB est la suivante: $M_{cu} = 1,80x b f_{cu} (d - 0,40x)$ (4.7)

avec les notations de la figure 4.6 et $f_{cu} = (0,85 f_{cj}) / \theta_{\gamma_c}$: la résistance de calcul du béton à la compression, fonction de la résistance caractéristique f_{cj} , et avec $\gamma_c = 1,50$; pour les combinaisons fondamentales et θ un coefficient en fonction de la durée d'application des charges.

Dans ce cas, le moment maximal repris par les armatures tendues supposées plastifiées et celui repris par le composite sont les suivants :

- armature : $M_s = A f_{yd} Z_a$ (4.8)

- composite : $M_f = A_f E_f \epsilon_{fd} Z_f$ (4.9)

$$\text{Avec : } Z_a = d - 0,4 x \approx 0,9 d \quad \text{et} \quad Z_f = h - 0,4 x \approx d$$

$$\epsilon_{fd} = \min \{ 1,10 \cdot (1\% - \epsilon_{s0}) ; \epsilon_{fu,d} \} \quad \text{et} \quad f_{yd} : \text{limite d'élasticité de l'armature.}$$

le moment ultime de la poutre renforcée est alors : $M_u = \min \{ M_{cu} ; M_s + M_f \}$ (4.10)

2^{ème} cas (pivot B ou D de la figure III. 10)

Le deuxième cas concerne la droite BD, les armatures sont plastifiées, la déformation des armatures tendues ϵ_{se} doit vérifier, avec ϵ_{se} la déformation élastique limite de l'acier d'armature et le coefficient de sécurité $\gamma_s = 1,15$

$$\epsilon_{se} = [f_{yd} / \gamma_s] / E_s = 0,217 \% < \epsilon_{fu,d} < 1,10 \cdot (1\% - \epsilon_{s0}) \quad (4.11)$$

Le moment ultime de la poutre renforcée est estimé en utilisant les mêmes équations que pour le premier cas: $M_u = \min \{ M_{cu} ; M_s + M_f \}$ (4.12)

3^{ème} cas (pivot B ou D de la figure III. 10)

Le troisième cas concerne la droite BD, mais les armatures passives ne sont pas plastifiées, la déformation élastique des armatures tendues doit être calculée à partir de l'équation :

$$s_s = \epsilon_{s0} + 0,91 \epsilon_{fu,d} < \epsilon_{se} = [f_{yd} / \gamma_s] / E_s \quad (4.13)$$

avec : s_s déformation élastique des armatures tendues

le moment de rupture de la poutre dû au pivot B et le moment repris par les plaques composites sont déterminés avec les mêmes équations que pour le premier cas, le moment repris par les aciers tendus est exprimé par: $M_s = A E_s \epsilon_s Z_a$ (4.14)

Le moment ultime de la poutre renforcée est: $M_u = \min \{ M_{cu} ; M_s + M_f \}$ (4.15)

Un seul cas idéal de rupture est pris en compte par la FIB : plastification des armatures tendues associée à la rupture du béton comprimé, le composite étant encore intact, avec prise en compte des armatures comprimées. L'AFGC impose, comme dans le cas du BAEL, une déformation limite à l'armature, qui de plus peut ne pas être plastifiées.

CHAPITRE 5

ANALYSE ET

DIMENSIONNEMENT

D'UNE POUTRE EN

BETON ARME

RENFORCEE PAR

COMPOSITES

5.1. Introduction:

Les structures en béton armé sont toujours dimensionnées pour une sollicitation donnée et un comportement choisi. Ils sont exécutés conformément aux plans. Les hypothèses originales admises peuvent ne plus être valable au cours de la vie de l'ouvrage, et cela pour diverses raisons dont: La modification de l'affectation de l'ouvrage, l'altération des matériaux de construction et de l'armature interne, les séismes ou incendies, la modification des normes sur les actions, les sécurités, etc. Une évaluation de l'état est la condition impérative pour élaborer un concept général de remise en état. Le renforcement des structures en béton armé est l'une des méthodes curatives utilisées pour la réhabilitation des structures afin d'en assurer la sécurité et le prolongement de la durée de vie.

Les méthodes analytiques utilisées pour prédire le dimensionnement d'éléments renforcés par des matériaux composites reposent sur les hypothèses conventionnelles du béton armé. Cependant, il convient de les adopter en prenant en compte le composite. Pour le calcul, en plus des hypothèses conventionnelles du béton armé, on suppose : une adhérence parfaite des lamelles de renforcement au béton (c'est-à-dire aucun glissement relatif des lamelles FRP par rapport au béton) et un comportement élastique linéaire des lamelles FRP.

L'objet de la présente chapitre est de développer une étude analytique pour le dimensionnement des poutres en béton armé renforcées en flexion et cisaillement au moyen de matériaux composites (PRFC: polymère renforcé en fibre de carbone), et faire ressortir les effets des différents paramètres qui influent sur le dimensionnement du renfort.

Cette étude est basée sur le concept de la méthode BAEL des poutres en béton armé soumises à la flexion simple aux états limites ultimes. Elles ont pour hypothèses:

- ❖ Le béton dans sa partie tendue est négligé.
- ❖ Les sections droites avant déformation restent droites après déformation.
- ❖ Pas de glissement relatif entre les armatures d'aciers et le béton (condition de compatibilité des déformations).
- ❖ Pas de glissement relatif entre le matériau composite et le béton (condition de compatibilité des déformations).

5.2. Dimensionnement d'une poutre rectangulaire renforcée par une plaque en matériaux composites FRP:

Le dimensionnement des poutres joue un rôle primordial dans la conception de structure des ouvrages ou des spécimens pour les essais aux laboratoires. Les poutres en béton armé conventionnellement possèdent deux modes de rupture, soit la rupture du béton en compression, soit la plastification de l'acier suivie de la rupture du béton en compression.

Le premier est à éviter dans la conception d'éléments en béton armé, il est dû à une forte densité d'acier (section surarmée). Le deuxième caractérise les poutres sous armées. La rupture du béton en compression survient lorsque la déformation de la fibre supérieure du béton dépasse la déformation ultime du béton. L'utilisation de matériaux composites crée un troisième mode de rupture, soit la rupture en tension du composite.

Il s'agit, dans cette présente méthode, de développer une méthode basé sur BAEL91 pour le dimensionnement d'une poutre rectangulaire renforcée par des plaques en composites, cette méthode est fondée sur l'équilibre des efforts dans une section en béton armé renforcée en flexion.

5.2. 1 . Conditions de compatibilités:

Considérons une section rectangulaire en béton armé de largeur b et de hauteur h , renforcées :

- Par une traction longitudinale des aciers de section A_s et de hauteur « d » à la face la plus tendue.
- Par une compression longitudinale des aciers de section A'_s et de hauteur « d' » à la face la plus comprimée.
- Par une bande de lamelle FRP de section A_{FRP} et de hauteur « d_{FRP} » à la face la plus tendue.

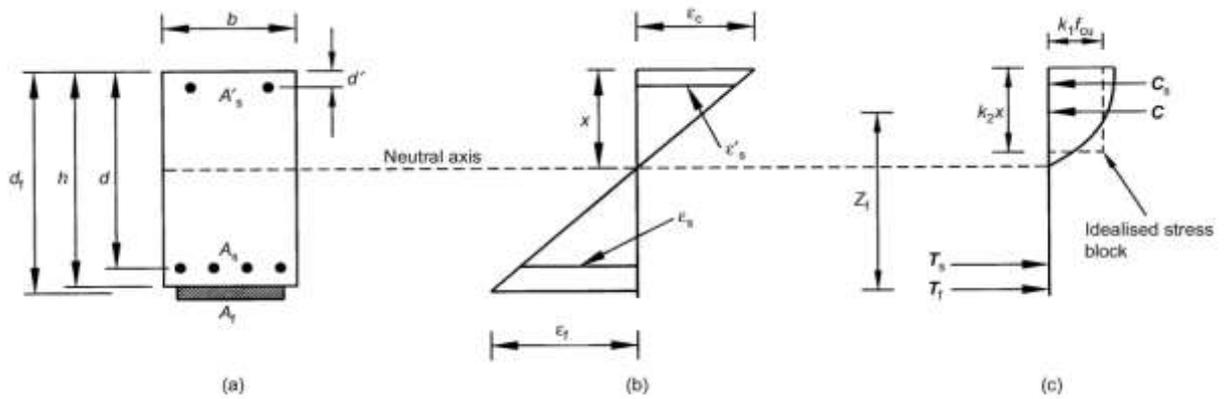


Figure 5.1 Section rectangulaire d'une poutre en béton armé renforcée par composites: géométrie, diagramme de distribution des déformations, des contraintes et des forces

$$\varepsilon_s = \frac{d-x}{x} \varepsilon_c \quad \varepsilon_s' = \frac{x-d'}{x} \varepsilon_c \quad \varepsilon_{FRP} = \frac{d_{FRP}-x}{x} \varepsilon_c \quad (5.1)$$

Avec : ε_s : déformation de l'acier tendu ε_s' : déformation de l'acier comprimé

ε_c : déformation du béton ε_{FRP} : déformation des lamelles FRP

Nous pouvons déterminer un paramètre α caractéristique de l'état de déformation de la

section par: $\alpha = \frac{x}{d_{FRP}}$

a) Conditions d'équilibres:

La distribution parabolique des contraintes dans le béton est remplacée par équivalence à une distribution rectangulaire, définie par les paramètres k_1 et k_2 :

- Force de compression du béton : $c = k_1 \cdot k_2 \cdot f_{cu} \cdot b \cdot x$ (5.2)

- Force de compression de l'acier : $c_s = A_s' \cdot \sigma_s'$ (5.3)

- Force de traction de l'acier : $T_s = A_s \cdot \sigma_s$ (5.4)

- Force de traction des lamelles FRP : $T_{FRP} = A_{FRP} \cdot \sigma_{FRP}$ (5.5)

Avec: $\sigma_{FRP} = E_{FRP} \cdot \varepsilon_{FRP}$

b) L'équilibre des forces :

$$c + c_S = T_S + T_{FRP} \Rightarrow k_1 \cdot k_2 \cdot f_{CU} \cdot b \cdot x + A_S' \cdot \sigma_S' = A_S \cdot \sigma_S + A_{FRP} \cdot \sigma_{FRP} \quad (5.6)$$

c) L'équilibre des moments:

On prend $d_{FRP} \approx h$ et Soit M_u le moment de flexion

$$M_U = k_1 \cdot k_2 \cdot f_{CU} \cdot b \cdot x \cdot z_{FRP} + A_S' \cdot \sigma_S' (d_{FRP} - d') - A_S \cdot \sigma_S (d_{FRP} - d) \quad (5.7)$$

$$M_U = A_{FRP} \cdot \sigma_{FRP} \cdot z_{FRP} + A_S' \cdot \sigma_S' (0.5 \cdot k_2 \cdot x - d') - A_S \cdot \sigma_S (z_{FRP} - d'') \quad (5.8)$$

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

$$z_{FRP} = d_{FRP} - 0.5 k_2 \cdot x = d_{FRP} (1 - 0.5 k_2 \alpha) \quad (5.9)$$

Avec:

$$x = \alpha \cdot d_{FRP} \quad (5.10)$$

d) Moment réduit:

Si nous reprenons l'expression ci-dessus (5.6):

$$M_U = k_1 \cdot k_2 \cdot f_{CU} \cdot b \cdot x \cdot z_F + A_S' \cdot \sigma_S' (d_F - d') - A_S \cdot \sigma_S (d_F - d) \quad (5.11)$$

Ou encore:

$$\frac{M_U + A_S \sigma_S (d_{FRP} - d) - A_S' \sigma_S' (d_{FRP} - d')}{b \cdot d_{FRP}^2 \cdot k_1 \cdot f_{CU}} = k_2 \alpha (1 - 0.5 k_2 \alpha) \quad (5.12)$$

Nous appelons cette quantité le moment réduit:

$$\mu = \frac{M_U + A_S \sigma_S (d_{FRP} - d) - A_S' \sigma_S' (d_{FRP} - d')}{b \cdot d_{FRP}^2 \cdot k_1 \cdot f_{CU}} = k_2 \alpha (1 - 0.5 k_2 \alpha) \quad (5.13)$$

Ce moment réduit augmente avec les sollicitations et lorsque les dimensions de la section diminuent.

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

$$\mu = k_2 \alpha - 0.5 k_2^2 \alpha^2 \Rightarrow 0.5 \alpha k_2^2 - k_2 \alpha + \mu = 0$$

$$\alpha = \frac{k_2 - \sqrt{k_2^2 - 2k_2^2 \mu}}{k_2^2} \quad (5.14a)$$

On pose :

$$\beta = 1 - 0.5 k_2 \alpha \quad (5.14b)$$

De l'équilibre du moment (5-8) on obtient la section du composite:

$$A_{FRP} = \frac{M_U - A_S \sigma_S (z_{FRP} - d'') - A_S' \sigma_S' (0.5 k_2 x - d')}{\sigma_{FRP} \cdot z_{FRP}} \quad (5.15a)$$

Avec:

$$\sigma_{FRP} = E_{FRP} \cdot \varepsilon_{FRP} \quad (5.15b)$$

5.2.2 . Validation de la présente méthode:

La présente méthode a été validée par une comparaison des résultats numériques obtenus avec le modèle Ashour 2002 . Nous pouvons constater que les résultats obtenus à partir de la présente méthode (1) coïncident avec ceux obtenus du modèle Ashour 2002 pour le dimensionnement de la section d'une plaque en composite comme c'est illustré dans le tableau de comparaison avec Mu= 300 KN.m

Tableau 5.1 :Caractéristiques et propriétés mécaniques des matériaux utilisées.

Caractéristique du matériau Béton		Caractéristique de l'Acier de construction			Caractéristique du renfort	
b= 205mm	f _{cu} = 30MPa	d = 400mm	As=1473mm ²	σ _s '=σ _s = 470MPa	Ef =37.10 ³ N/mm ²	
d _{FRP} ≈ 455mm	ε _{bc} =0.0035	d' = d''= 55mm	As'=265.33 mm ²	Es=200000 MPa	k ₁ = 0.67	k ₂ = 0.9

Le moment réduit et le paramètre caractéristique sont calculés par les formules:

(5.13) et(5.14)

$$\mu = \frac{300.10^6 - 265,33.456(400) + 1472.456(55)}{205.455^2 \cdot 0.67 \cdot 30} = 0,338$$

$$\alpha = \frac{0,9 - \sqrt{0,81 - 1,62 \cdot 0,338}}{0,81} = 0,479$$

$$\beta = 1 - 0,45(0,479) = 0,784$$

On obtient sur le bras de levier z_{FRP} , la position de l'axe neutre par:

$$z_{FRP} = 455(1 - 0,45 \cdot 0,479) = 356,89mm$$

$$x = 0,479 \cdot 455 = 218,01mm$$

Par la méthode des triangles semblables on peut avoir ϵ_{FRP} :

$$\epsilon_{FRP} = \frac{455 - 218,01}{218,01} \cdot 0,0035 = 0,00380$$

$$\sigma_{FRP} = 37 \cdot 10^3 \cdot 0,0038 = 140,77 N / mm^2$$

Finalement, la section de la plaque composite CFRP est (5 .15)

$$A_{FRP} = \frac{300.10^6 - 1473.456(356,92 - 55) - 256,33.456(98,08 - 55)}{140,77 \cdot 356,89}$$

$$A_{FRP} = 1831,35mm^2$$

La comparaison et le sommaire de calcul est présenté dans le tableau (5-2) pour un modèle d'une poutre en béton armé renforcée par composite en CFRP:

Tableau5.2 comparaison des résultats de la présente méthode et le modèle du Ashour 2002

Model de calcul	Z_{FRP} (mm)	X (mm)	ϵ_{FRP}	A_{FRP} (mm ²)
Modèle Ashour [4]	357	217,80	0,00381	1834,50
Présente méthode (1)	356,89	218,10	0,00380	1831,35

✓ **Paramètre influant sur le dimensionnement en flexion :**

On s'intéresse dans cette étude sur l'influence des différents paramètres sur le dimensionnement dans une poutre rectangulaire en béton armé avec armatures comprimées non endommagée renforcée par une plaque en matériaux composite

. Effet de la résistance du béton f_{cu} :

L'effet de la résistance du béton sur le dimensionnement d'une poutre rectangulaire en béton armé renforcée en flexion par une plaque en composite est illustré dans la figure (5.2)

Nous pouvons constater que la résistance caractéristique du béton influe sur le dimensionnement et nous pouvons enregistrer des sections du composite plus grande lorsque la résistance caractéristique du béton diminue et vice-versa.

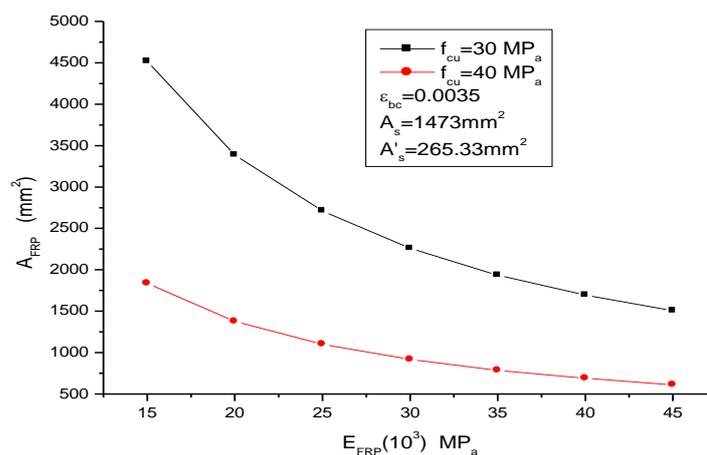


Figure 5 .2: Effet de la contrainte limite d'élasticité de l'acier sur le dimensionnement de la section d'une plaque en composite CFRP pour une poutre rectangulaire en béton armé non endommagée

. Effet de la déformation unitaire du béton ϵ_{bc} :

La figure (5.3) montre l'influence de la variation de déformation unitaire du béton sur le dimensionnement de la poutre précédente qui diminue avec l'accroissement de la déformation unitaire du béton.

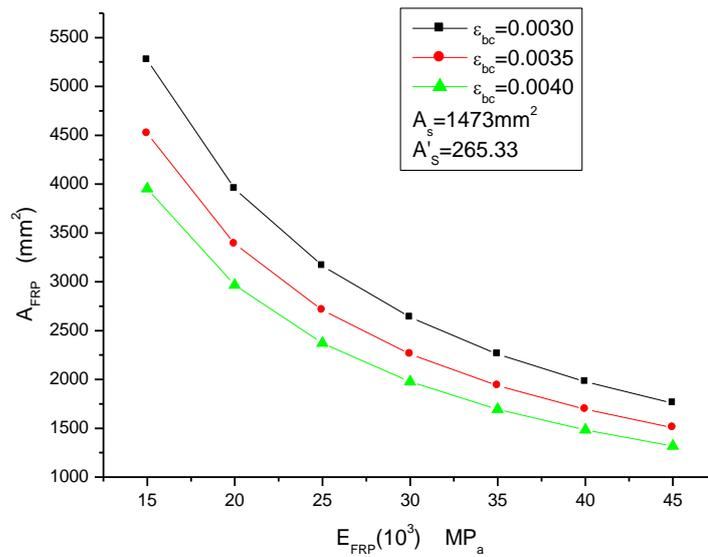


Figure 5.3: Effet de la déformation unitaire du béton sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé non endommagée en flexion renforcée par une plaque en composite CFRP

Effet de la fraction volumétrique des fibres :

A partir de la figure (5.4) nous pouvons constater que plus on augmente la fraction volumétrique des fibres, plus la section du composite devient faible et cela revient sur la résistance et le module de Young des fibres qui sont important à ceux de la matrice.

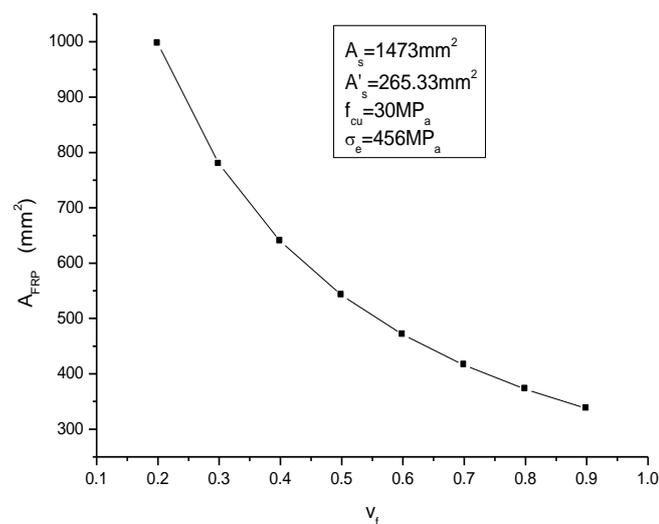


Figure 5.4: Effet de la fraction volumétrique des fibres sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque en composite

Effet du taux de renforcement d'armature:

Les figures (5.5) montre l'influence de la variation du taux de renforcement pour une poutre en béton armé sur le dimensionnement du composite CFRP.

Nous pouvons enregistrés que le taux de renforcement intérieur en acier pour une poutre en béton armé à une grande influence sur le dimensionnement qui est faible dans une poutre sur armée et important si elle est sous armée.

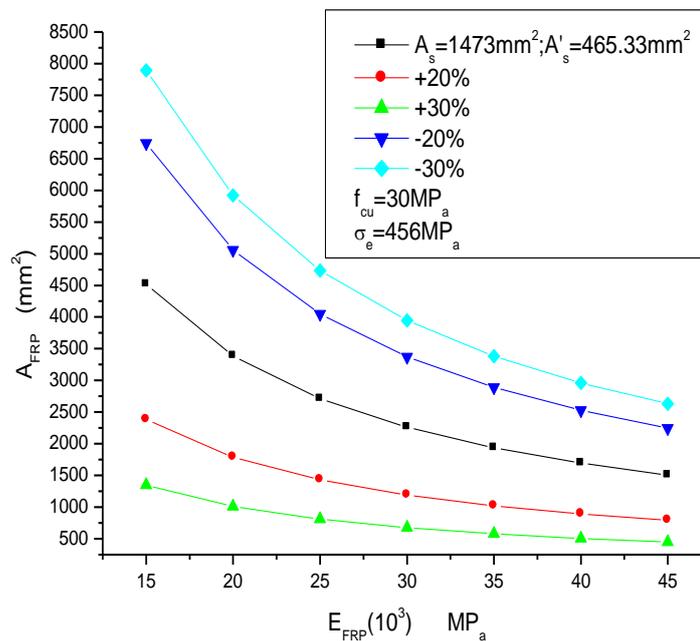


Figure 5.5: Effet du taux de renforcement d'armature sur le dimensionnement d'une poutre rectangulaire en béton armé renforcée par CFRP

Effet de variation des conditions hygrothermiques:

L'effet de la variation des conditions hygrothermiques sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par une plaque en composite CFRP sont illustrées dans les figures (5.6) et (5.7).

Nous pouvons enregistrer que les conditions hygrothermiques ont de faibles influences sur le dimensionnement des poutres en béton armé renforcée par CFRP.

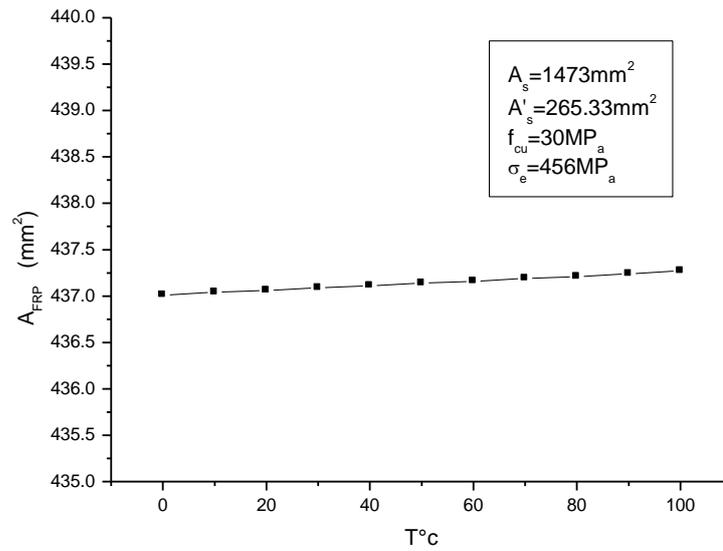


Figure 5.6: Effet de la variation de la température sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion des plaques en matériaux composite

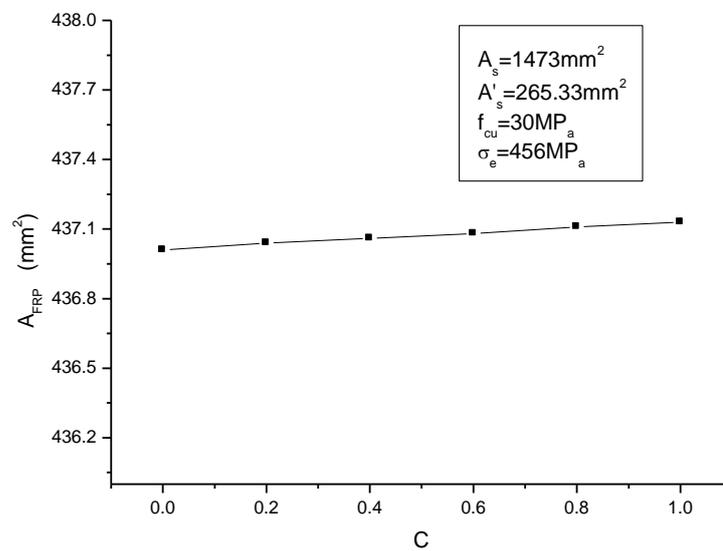


Figure 5.7: Effet de la variation d'humidité sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque en composite CFRP

Effet de la variation de la géométrie de la section:

A partir des figures (5.8) et (5.9) on peut voir l'importance de la variation de la géométrie de la section (le rapport h/b et l'enrobage) sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par une plaque en composite CFRP qui diminue avec l'accroissement du rapport h/b mais il est proportionnel avec l'accroissement de l'enrobage.

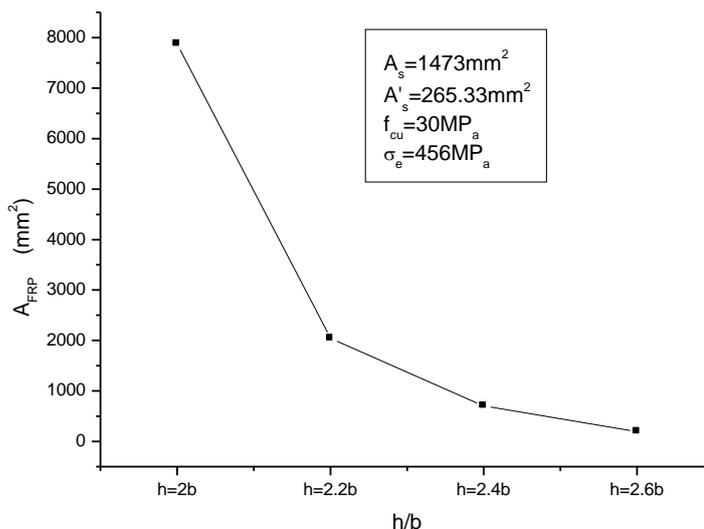


Figure 5.8: Effet de la variation du rapport h/b sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par une plaque en composite CFRP

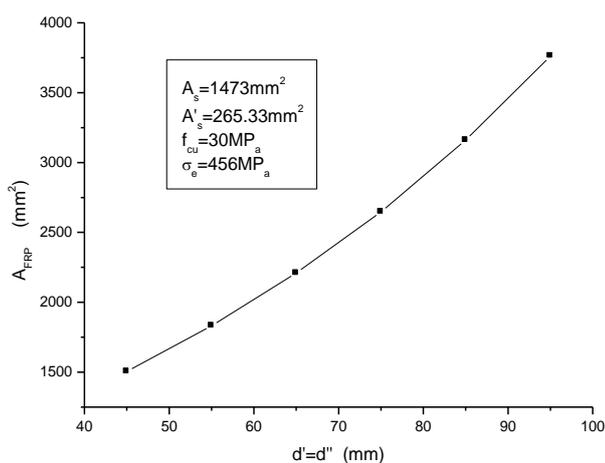


Figure 5.9: Effet de variation de l'enrobage sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par une plaque en matériaux composite CFRP

5. 3. Elément en béton arme soumis à la flexion :

Dans cette partie, on va étudier les différentes sections avec leurs différents ferrailages (sans armatures comprimées et avec armatures comprimées).

5. 3.1. Les poutres rectangulaires :

Les poutres rectangulaires sans armatures comprimées :

Il s'agit, dans cette présente méthode, de développer une méthode basé sur BAEL91 pour le dimensionnement d'une poutre rectangulaire en béton armé sans armature comprimée renforcée par des plaques en composites, cette méthode est fondée sur l'équilibre des efforts dans une section en béton armé renforcée en flexion.

Considérons une section rectangulaire en béton armé de largeur b et de hauteur h , sans armature comprimée renforcées par la plaque composite figure (5.10) :

- Par une traction longitudinale des aciers de section A_s et de hauteur « d » à la face la plus tendue.
- Par une bande de lamelle FRP de section A_{FRP} et de hauteur « h » à la face la plus tendue.

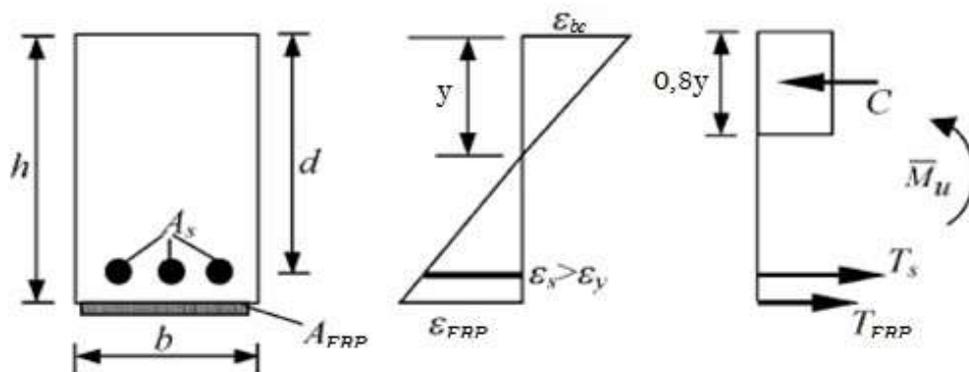


Figure 5.10 :Setion rectangulaire d'une poutre en béton armé sans armature comprimée renforcée par composites: géométrie, diagramme de distribution des déformations, des contraintes et des forces.

a) L'équilibre des forces

$$C = T_s + T_{FRP} \quad (5.16)$$

Soit :

C : La force de compression du béton ;

$$C = 0,8y.b.\sigma_{bc} \quad (5.17)$$

$$T_s = A_s \cdot \sigma_s \quad (5.18)$$

T_s : La force de traction de l'acier ;

T_f : La force de traction des lamelles FRP ;

$$T_{FRP} = A_{FRP} \cdot \sigma_{FRP} \quad (5.19)$$

$$0,8y.b.\sigma_{bc} = A_s \cdot \sigma_s + A_{FRP} \cdot \sigma_{FRP} \quad (5.20)$$

$$A_{FRP} = \frac{0,8y.b.\sigma_{bc} - A_s \cdot \sigma_s}{\sigma_{FRP}} \quad (5.21)$$

On divise (5.21) sur b d :

$$\frac{A_{FRP}}{b.d} = \frac{0,8y.b.\sigma_{bc}}{b.d.\sigma_{FRP}} - \frac{A_s \cdot \sigma_s}{b.d.\sigma_{FRP}} \quad (5.22)$$

$$\rho_{FRP} = \frac{0,8y.\sigma_{bc}}{d.\sigma_{FRP}} - \rho_s \frac{\sigma_s}{\sigma_{FRP}} \quad (5.23)$$

$$\rho_{FRP} = \frac{A_{FRP}}{b.d} ; \rho_s = \frac{A_s}{b.d} \quad (5.24)$$

b) L'équilibre des moments:

$$M = A_s \cdot \sigma_s (d - 0,4y) + A_{FRP} \cdot \sigma_{FRP} (h - 0,4y) \quad (5.25)$$

On multiplie (5.25) par $\frac{1}{b.h^2.\sigma_{bc}}$:

$$\frac{M}{b.h^2.\sigma_{bc}} = \frac{A_s \cdot \sigma_s \cdot d}{b.h^2.\sigma_{bc} \cdot d} (d - 0,4y) + \frac{A_{FRP} \cdot \sigma_{FRP} \cdot d}{b.h^2.\sigma_{bc} \cdot d} (h - 0,4y) \quad (5.26)$$

$$\frac{M}{b.h^2.\sigma_{bc}} = \rho_s \frac{\sigma_s \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h^2} (d - 0,4y) + \rho_{FRP} \frac{\sigma_{FRP} \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h^2} (h - 0,4y) \quad (5.27)$$

On remplace (5.23) dans (5.27) :

$$\frac{M}{b.h^2.\sigma_{bc}} = \rho_s \frac{\sigma_s.d}{\sigma_{bc}.h^2} (d - 0,4y) + \left(\frac{0,8y.\sigma_{bc}}{d.\sigma_{FRP}} - \rho_s \frac{\sigma_s}{\sigma_{FRP}} \right) \frac{\sigma_{FRP}.d}{\sigma_{bc}.h^2} (h - 0,4y) \quad (5.28)$$

Après la simplification on a :

$$\frac{M}{b.h^2.\sigma_{bc}} = 0,8 \frac{y}{h} - 0,32 \frac{y^2}{h^2} + \rho_s \frac{\sigma_s.d}{\sigma_{bc}.h} \left(\frac{d}{h} - 1 \right) \quad (5.29)$$

$$0,32 \left(\frac{y}{h} \right)^2 - 0,8 \frac{y}{h} + \left[\rho_s \frac{\sigma_s.d}{\sigma_{bc}.h} \left(1 - \frac{d}{h} \right) + \frac{M}{b.h^2.\sigma_{bc}} \right] = 0 \quad (5.30)$$

Posons :

$$Q_u = \left[\rho_s \frac{\sigma_s.d}{\sigma_{bc}.h} \left(1 - \frac{d}{h} \right) + \frac{M}{b.h^2.\sigma_{bc}} \right] \quad (5.31)$$

Donc (5.30) devient :

$$0,32 \left(\frac{y}{h} \right)^2 - 0,8 \frac{y}{h} + Q_u = 0 \quad (5.32)$$

La solution de l'équation (5.32) est :

$$\frac{y}{h} = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2Q_u}) \quad (5.33)$$

D'après le diagramme de distribution des déformations On calcul ε_{FRP} :

$$\frac{\varepsilon_{bc}}{y} = \frac{\varepsilon_{FRP}}{h-y} \rightarrow \varepsilon_{FRP} = \varepsilon_{bc} \cdot \left(\frac{h}{y} - 1 \right) \quad (5.34)$$

Donc on peut calculer σ_{FRP} par la loi de Hooke :

$$\sigma_{FRP} = \varepsilon_{FRP} . E_{FRP} \quad (5.35)$$

Donc la section du composite FRP :

Soit :

$$A_{FRP} = \frac{M - A_s \cdot \sigma_s (d - 0,4 \cdot y)}{\sigma_{FRP} (h - 0,4 \cdot y)} \quad (5.36)$$

$$A_{FRP} = \frac{\rho_{FRP}}{b \cdot d} \quad (5.37)$$

Validation de la présente méthode :

La présente méthode a été validée par une comparaison des résultats numériques obtenus avec le modèle du Hayder A. Rasheed 2003 [17], avec $M_u=435.5$ KN.m.

Tableau 5.3 :Caractéristiques et propriétés mécaniques des matériaux utilisées.

Caractéristique du matériau béton		Caractéristique de l'Acier de construction		Caractéristique du renfort
$b = 305$ mm	$\sigma_{bc} = 19.84$ MPa	$d = 546$ mm	$\sigma_s = 414$ MPa	$E_f = 36,98$ GPa
$h = 610$ mm	$\varepsilon_{bc} = 0.003$	$A_s = 1936$ mm ²	$E_s = 200000$ MPa	$M_u = 435.5$ KN.m

D'abord on calcule y en utilisant les équations (5.16) et (5.18) :

$$Q_U = \left[\frac{1936}{305 \cdot 546} \frac{414 \cdot 546}{19,84 \cdot 610} \left(1 - \frac{546}{610} \right) + \frac{435,5 \cdot 10^6}{305 \cdot (610)^2 \cdot 19,84} \right]$$

$$Q_U = 0,2161$$

$$\frac{y}{h} = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2(0,2161)}) \Leftrightarrow y = 188.03 \text{ mm}$$

On utilise l'équation (5.34):

$$\varepsilon_{FRP} = 0,003 \cdot \left(\frac{610}{188.03} - 1 \right) \Rightarrow \varepsilon_{FRP} = 0.0067$$

D'après l'équation (5.35) :

$$\sigma_{FRP} = 0,0067 \times 36,98 \cdot 10^3 \Leftrightarrow \sigma_{FRP} = 248,96 \text{ MPa}$$

Maintenant on calcule la section du composite d'après l'équation (5.36) :

$$A_{FRP} = \frac{435,5 \cdot 10^6 - 1936,414(546 - 0,4 \cdot 188,03)}{248,96(610 - 0,4 \cdot 188,03)} \Leftrightarrow A_{FRP} = 436,85 \text{ mm}^2$$

Nous pouvons constater que les résultats obtenus à partir de la présente méthode coïncident avec ceci pour le dimensionnement de la section rectangulaire sans armature comprimée renforcée par une plaque en composite comme c'est illustré dans le tableau de comparaison.

Tableau 5.4 : Comparaison des résultats de la présente méthode modèle de Hayder.

Modèle de calcul	A_{FRP} (mm ²)
Modèle HayderA.Rasheed 2003	431.5
Présente méthode "code BAEL"	436.85

Paramètre influant sur le dimensionnement en flexion :

On s'intéresse dans cette étude sur l'influence des différents paramètres sur le dimensionnement dans une poutre rectangulaire en béton armé avec armatures comprimées non endommagée renforcée par une plaque en matériaux composites.

a) Effet de la résistance du béton f_{c28} :

L'effet de la résistance du béton sur le dimensionnement d'une poutre rectangulaire en béton armé sans armatures comprimées renforcée en flexion par une plaque de composite figure (5.10), on constate que lorsque la résistance caractéristique du béton diminue les sections du composite seront plus grandes.

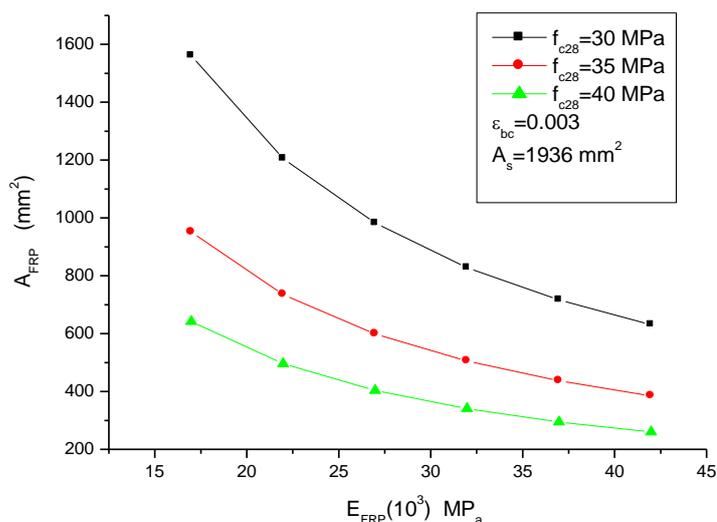


Figure 5.11: Effet de la résistance du béton sur le dimensionnement d'une poutre rectangulaire en béton armé sans armatures comprimées renforcée par CFRP.

b) Effet de la contrainte limite d'élasticité de l'acier σ_s :

L'influence des différentes valeurs de la contrainte limite d'élasticité de l'acier est présentée sur la figure (5.11). On peut dire que le dimensionnement du composite dépend contrairement avec la contrainte limite de l'acier σ_e .

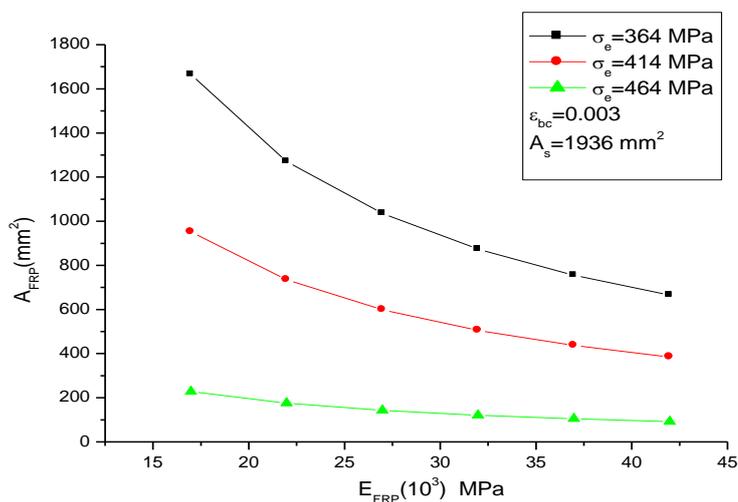


Figure 5.12: Effet de la contrainte limite d'élasticité de l'acier sur le dimensionnement de la section du composite pour une poutre rectangulaire en béton armé sans armatures comprimées.

c) Effet de la déformation unitaire du béton ϵ_{bc} :

L'influence de la variation de déformation unitaire du béton sur le dimensionnement de la poutre précédente qui diminue avec l'accroissement de la déformation unitaire du béton représenté par la figure (5.13).

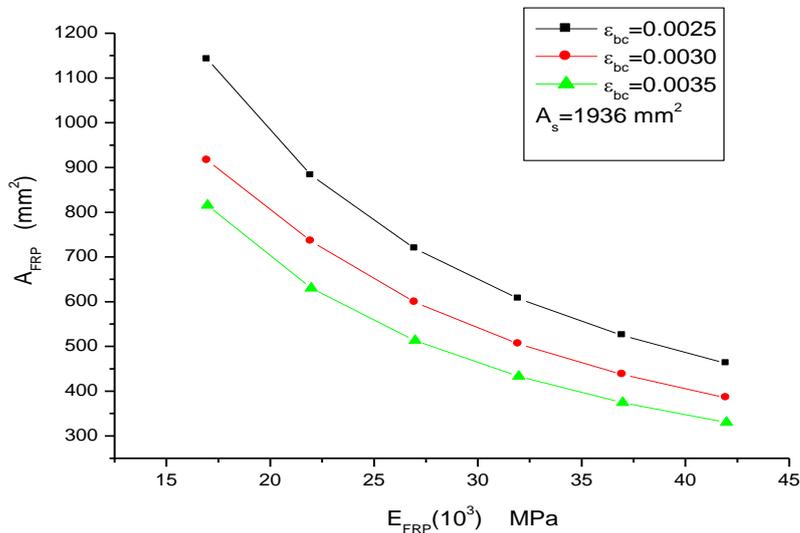


Figure 5.13: Effet de la déformation unitaire du béton sur le dimensionnement d'une poutre en béton armé sans armatures comprimées en flexion renforcée par CFRP.

d) *Effet du taux de renforcement intérieur en acier :*

La figure (5.14) montre l'influence de la variation du taux de renforcement pour une poutre rectangulaire en béton armé sur le dimensionnement du composite CFRP. Nous pouvons enregistrer que la section du renfort diminue dans une poutre sur armée et croisse si elle est sous-armée.

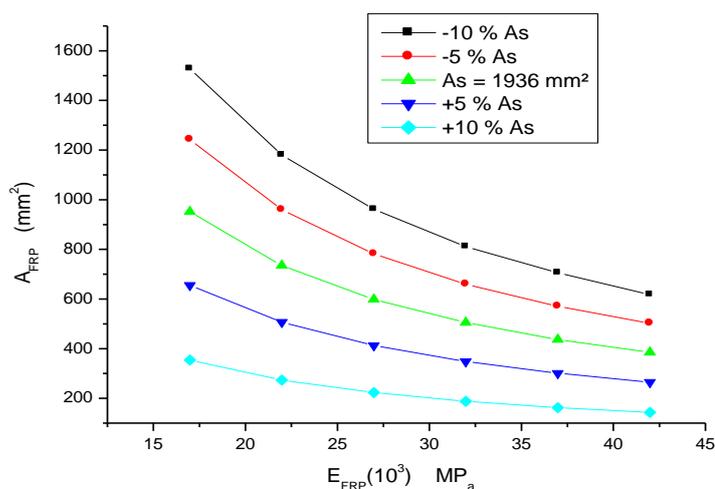


Figure 5.14 : Effet du taux de renforcement sur le dimensionnement d'une poutre rectangulaire en béton armé sans armatures comprimées renforcée par CFRP.

Les poutres rectangulaires avec armatures comprimées :

Considérons une section rectangulaire en béton armé de largeur b et de hauteur h , avec armature comprimée renforcées par la plaque composite figure (5.15) :

- Par une traction longitudinale des aciers de section A_s et de hauteur « d » à la face la plus tendue.
- Par une compression longitudinale des aciers de section A'_s et de hauteur « d' » à la face la plus comprimée.
- Par une bande de lamelle composite de section A_r et de hauteur « h » à la face la plus tendue.

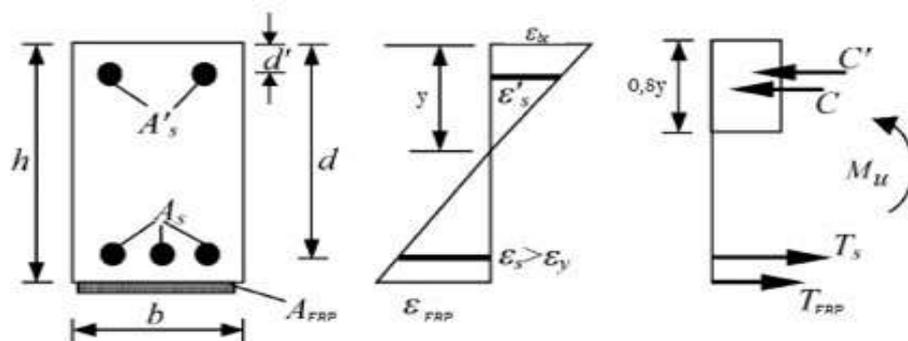


Figure 5.15: Section rectangulaire avec armatures comprimées renforcée par CFRP : géométrie, diagramme de distribution des déformations, des contraintes et des forces

a) L'équilibre des forces :

$$C + C' = T_s + T_{FRP} \quad (5.23)$$

Soit :

C : La force de compression du béton ;

$$C = 0,8y.b.\sigma_{bc} \quad (5.24)$$

C' : La force de compression de l'acier ;

$$C' = A_s' . \sigma_s' \quad (5.25)$$

T_s : La force de traction de l'acier ;

$$T_s = A_s . \sigma_s \quad (5.26)$$

T_{FRP} : La force de traction des lamelles composite ;

$$T_{FRP} = A_{FRP} . \sigma_{FRP} \quad (5.27)$$

$$0,8y.b.\sigma_{bc} + A_s' . \sigma_s' = A_s . \sigma_s + A_{FRP} . \sigma_{FRP} \quad (5.28)$$

$$A_{FRP} = \frac{0,8y.b.\sigma_{bc} + A_s' . \sigma_s' - A_s . \sigma_s}{\sigma_{FRP}} \quad (5.29)$$

On divise (5.29) sur b d :

$$\frac{A_{FRP}}{b.d} = \frac{0,8y.b.\sigma_{bc}}{b.d.\sigma_{FRP}} + \frac{A_s' . \sigma_s'}{b.d.\sigma_{FRP}} - \frac{A_s . \sigma_s}{b.d.\sigma_{FRP}} \quad (5.30)$$

$$\rho_{FRP} = \frac{0,8y}{d} \frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{FRP}} + \rho_s' \frac{\sigma_s'}{\sigma_{FRP}} - \rho_s \frac{\sigma_s}{\sigma_{FRP}} \quad (5.31)$$

Soit :

$$\rho_f = \frac{A_f}{b.d} ; \rho_s = \frac{A_s}{b.d} ; \rho_s' = \frac{A_s'}{b.d} \quad (5.32)$$

L'équilibre des moments:

$$M = A_{FRP} . \sigma_{FRP} (h - 0,4y) + A_s . \sigma_s (d - 0,4y) + A_s' . \sigma_s' (0,4y - d') \quad (5.33)$$

On multiplie (5.33) par :

$$\frac{M}{b \cdot h^2 \cdot \sigma_{bc}} = \frac{A_s \cdot \sigma_s \cdot d}{b \cdot h^2 \cdot \sigma_{bc} \cdot d} (d - 0,4y) + \frac{A_{FRP} \cdot \sigma_{FRP} \cdot d}{b \cdot h^2 \cdot \sigma_{bc} \cdot d} (h - 0,4y) + \frac{A_s' \cdot \sigma_s' \cdot d}{b \cdot h^2 \cdot \sigma_{bc} \cdot d} (0,4y - d') \quad (5.34)$$

$$\frac{M}{b \cdot h^2 \cdot \sigma_{bc}} = \rho_s \frac{\sigma_s \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h^2} (d - 0,4y) + \rho_{FRP} \frac{\sigma_{FRP} \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h^2} (h - 0,4y) + \rho_s' \frac{\sigma_s' \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h^2} (0,4y - d') \quad (5.35)$$

On place (5.31) dans (5.35) et après la simplification on a :

$$\frac{M}{b \cdot h^2 \cdot \sigma_{bc}} = 0,8 \frac{y}{h} - 0,32 \frac{y^2}{h^2} + \rho_s \frac{\sigma_s \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h^2} (d - h) + \rho_s' \frac{\sigma_s' \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h^2} (h - d') \quad (5.36)$$

$$0,32 \left(\frac{y}{h} \right)^2 - 0,8 \frac{y}{h} + \left[\rho_s \frac{\sigma_s \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h} \left(1 - \frac{d}{h} \right) - \rho_s' \frac{\sigma_s' \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h} \left(1 - \frac{d'}{h} \right) + \frac{M}{b \cdot h^2 \cdot \sigma_{bc}} \right] = 0 \quad (5.37)$$

$$0,32 \left(\frac{y}{h} \right)^2 - 0,8 \frac{y}{h} + Q_u' = 0 \quad (5.38)$$

Avec :

$$Q_u' = \frac{M}{b \cdot h^2 \cdot \sigma_{bc}} + \rho_s \frac{\sigma_s \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h} \left(1 - \frac{d}{h} \right) - \rho_s' \frac{\sigma_s' \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h} \left(1 - \frac{d'}{h} \right) \quad (5.39)$$

La solution de l'équation (5.38) est :

$$\frac{y}{h} = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2Q_u'}) \quad (5.40)$$

D'après le diagramme de distribution des déformations On calcul ε_{FRP} :

$$\frac{\varepsilon_{bc}}{y} = \frac{\varepsilon_{FRP}}{h - y} \rightarrow \varepsilon_{FRP} = \varepsilon_{bc} \cdot \left(\frac{h}{y} - 1 \right) \quad (5.41)$$

Donc on peut calculer σ_{FRP} par la loi de Hooke :

$$\sigma_{FRP} = \varepsilon_{FRP} \cdot E_{FRP} \quad (5.42)$$

Donc la section du composite CFRP :

$$A_{FRP} = \frac{M - A_s \cdot \sigma_s (d - 0,4y) - A_s' \cdot \sigma_s' (0,4y - d')}{\sigma_{FRP} (h - 0,4y)} \quad (5.43)$$

Ou :

$$A_{FRP} = \frac{\rho_{FRP}}{b.d} \quad (5.44)$$

✓ **Validation de la présente méthode :**

La présente méthode a été validée par une comparaison des résultats numériques obtenus avec le modèle du Hayder A. Rasheed 2003 et Chaallal O, Nollet 1998 [7], avec $M_u=500$ KN.m.

Tableau 5.5:Caractéristiques et propriétés mécanique des matériaux utilisées.

Caractéristique du matériau Béton		Caractéristique de l'Acier de construction			Caractéristique du renfort
b=350mm	$\sigma_{bc}=17$ MPa	d=535 mm	$A_s=2400$ mm ²	$\sigma_s'=\sigma_s=400$ MPa	$E_f =150$ GPa
h=600mm	$\varepsilon_{bc}=0.003$	d'=58mm	$A_s'=400$ mm ²	$E_s=200000$ MPa	$M_u=500$ KN.m

On calcul les équations (5.39) et (5.40) :

$$Q_u' = \frac{500.10^6}{350.(600)^2.17} + \frac{2400.400.535}{350.535.17.600} \left(1 - \frac{535}{600}\right) - \frac{400.400.535}{17.600 \cdot 350 \cdot 535} \left(1 - \frac{58}{600}\right)$$

$$Q_u' = 0.222$$

$$\frac{y}{h} = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2(0.222)}) \Rightarrow y = 190.83 \text{ mm}$$

D'après l'équation (5.41) on calcul ε_{FRP} :

$$\varepsilon_{FRP} = 0.003 \cdot \left(\frac{600}{190.83} - 1\right) \Rightarrow \varepsilon_{FRP} = 0.0064$$

Donc on peut calculer σ_{FRP} :

$$\sigma_{FRP} = 64.10^{-4} \cdot 150.10^3 \Rightarrow \sigma_{FRP} = 964,85 \text{ MPa}$$

Donc la section du composite CFRP :

$$A_{FRP} = \frac{500.10^6 - 2400.400(535 - 0,4.190,83) - 400.400(0,4.190,83 - 58)}{964,85(600 - 0,4.190,83)}$$

$$A_{FRP} = 112,31 \text{ mm}^2$$

Nous pouvons constater que les résultats obtenus à partir de la présente méthode rapprochent avec ceux ci pour le dimensionnement de la section rectangulaire avec armature comprimée renforcée par une composite comme c'est illustré dans le tableau de comparaison

Tableau 5.6 : Comparaison des résultats de la présente méthode avec les différents modèles.

Modèle de calcul	A_{FRP} (mm ²)
Modèle HayderA.Rasheed 2003	112.40
Modèle Chaallal O, Nollet 1998	114.40
Présente méthode "code BAEL"	112.31

Paramètre influant sur le dimensionnement en flexion :

On s'intéresse dans cette étude sur l'influence des différents paramètres sur le dimensionnement dans une poutre rectangulaire en béton armé avec armatures comprimées non endommagée renforcée par une plaque en matériaux composites.

a) Effet de la résistance caractéristique du béton :

L'effet de la résistance caractéristique du béton sur le dimensionnement d'une poutre rectangulaire en béton armé renforcée en flexion par une plaque en composite est illustré dans la figure (5.16).

Nous pouvons constater que la résistance caractéristique du béton influe sur le dimensionnement et nous pouvons enregistrer des sections du composite plus grande lorsque la résistance caractéristique du béton diminue.

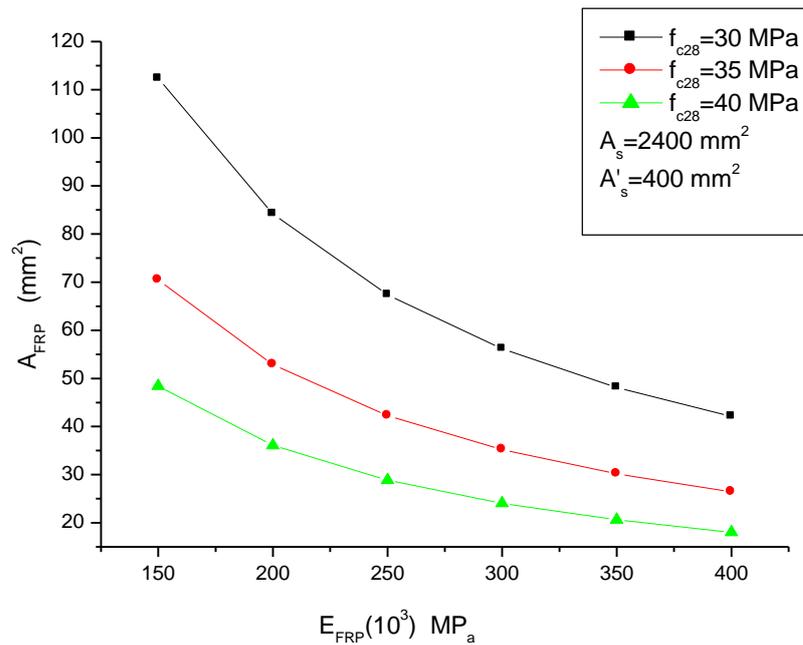


Figure 5.16 : Effet de la résistance caractéristique du béton sur le dimensionnement d'une poutre rectangulaire renforcée en flexion par CFRP.

b) effet de la déformation unitaire du béton ε_{bc} :

La figure (5.17) montre l'influence de la variation de déformation unitaire du béton sur le dimensionnement de la poutre précédente qui diminue avec l'accroissement de la déformation unitaire du béton.

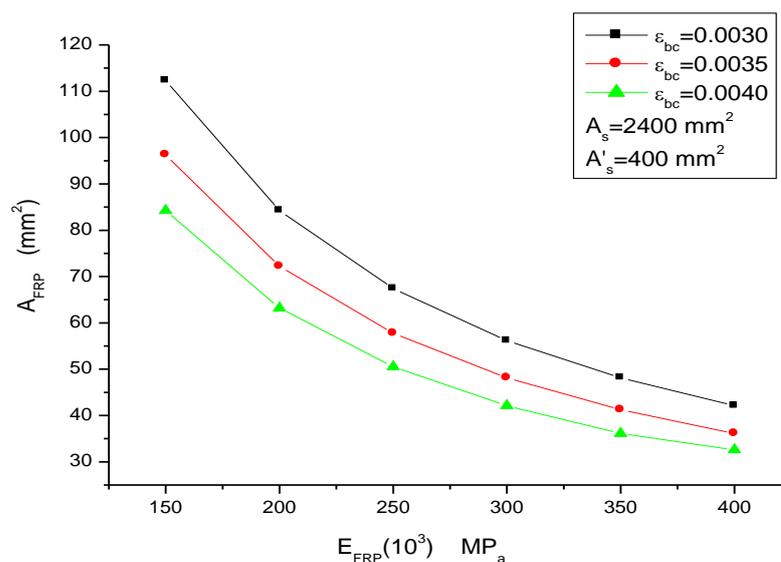


Figure 5.17 : Effet de la déformation unitaire du béton sur le dimensionnement d'une poutre rectangulaire avec armature comprimée en flexion renforcée par CFRP.

c) *Effet de la contrainte limite d'élasticité de l'acier σ_s :*

L'influence des différentes valeurs de la contrainte limite d'élasticité de l'acier est présentée sur la figure (5.18). On peut dire que le dimensionnement du composite dépend contrairement avec la contrainte limite de l'acier σ_s .

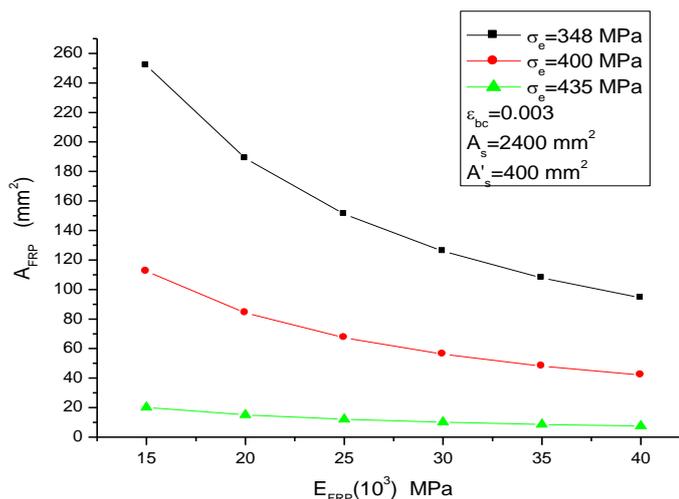


Figure 5.18 : Effet de la contrainte limite d'élasticité de l'acier sur le dimensionnement de la section du composite pour une poutre rectangulaire en béton armé sans armatures comprimées.

d) Effet du taux de renforcement intérieur en acier :

La figure (5.19) montre l'influence de la variation du taux de renforcement pour une poutre rectangulaire en béton armé sur le dimensionnement du composite CFRP. Nous pouvons enregistrer que la section du renfort diminue dans une poutre sur armée et croisse si elle est sous-armée.

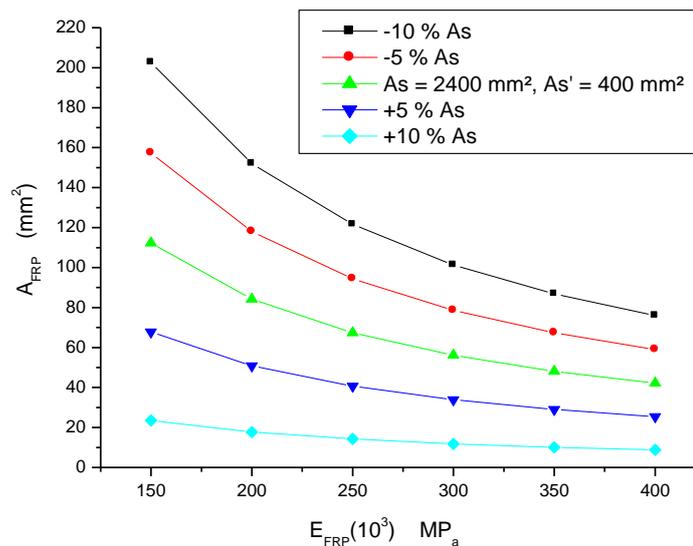


Figure 5.19 : Effet du taux de renforcement sur le dimensionnement d'une poutre rectangulaire en béton armé renforcée par CFRP.

5.3.2 Les poutres en T :

L'objet de la présente étude est de développer une approche analytique pour le dimensionnement d'une section en T en béton armé renforcée en flexion au moyen de matériaux composites.

a). Dimensionnement et vérification:

Pour le dimensionnement d'une section en T renforcée par composite CFRP on adoptera la démarche suivante:

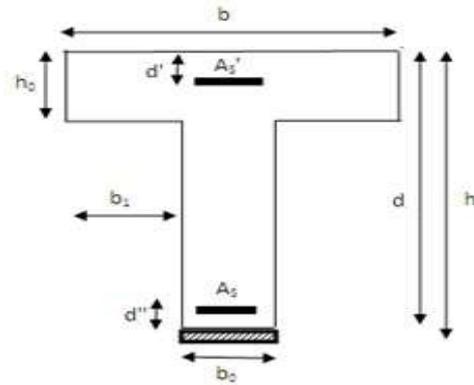


Figure 5.20: Géométrie d'une section en T d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par composites CFRP.

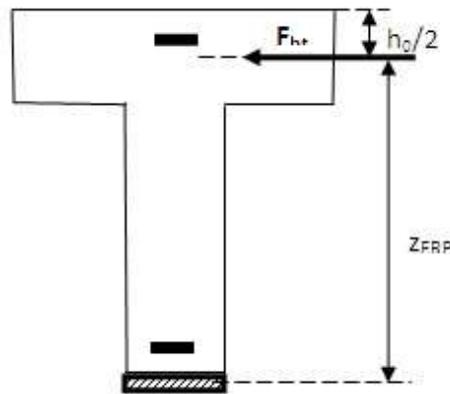
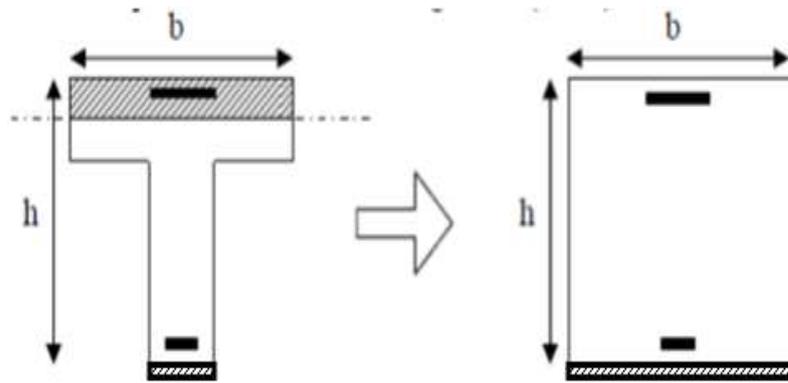


Figure 5.21 : Analyse d'une section en T en béton armé renforcée en composite CFRP.

$$\left. \begin{array}{l} N_{bc} = K_1 f_{bc} b h_0 \\ N_s = A_s \sigma_s \\ z_{FRP} = h - \frac{h_0}{2} \end{array} \right\} \longrightarrow M_t = K_1 f_{bc} b h_0 \left(h - \frac{h_0}{2} \right) - A_s \sigma_s (h - d) \quad (5.45)$$

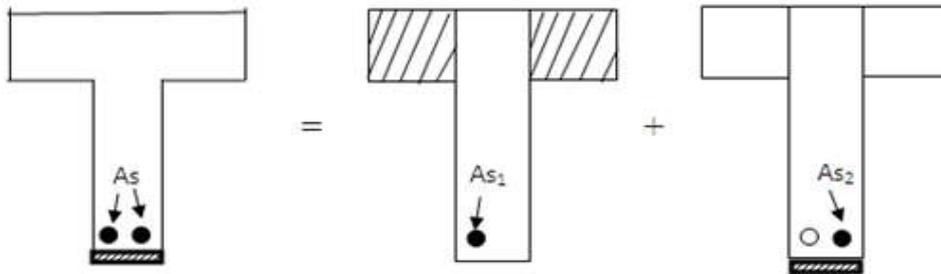
1^{er} cas: Si $M_u \leq M_t$

La table n'est pas entièrement comprimée. Le dimensionnement du composite sera identique à une section rectangulaire ($b \times h$).



2^{ème} cas: Si $M_u \geq M_t$

La table est entièrement comprimée. Le dimensionnement du composite sera en décomposant la section en Té de la manière suivante :



Le moment équilibré par les débords:

$$M_d = 2 \left[\frac{b - b_0}{2} \right] h_0 k_1 f_{bc} \left(d - \frac{h_0}{2} \right) \quad (5.46)$$

$$M_d = (b - b_0) h_0 k_1 f_{bc} \left(d - \frac{h_0}{2} \right) \dots \dots \dots (5.47)$$

$$A_{s1} = \frac{M_d}{\sigma_s \left(d - \frac{h_0}{2} \right)} \dots \dots \dots (5.48)$$

a) Le moment équilibré par la section $b_0 \times h$:

Le moment résiduel sera:

$$M_R = M_u - M_d \quad (5.49)$$

$$A_{s2} = A_s - A_{s1} \quad (5.50)$$

b) L'expression du moment réduit sera :

$$\mu = \frac{M_R - A'_S \sigma'_S (h - d') + A_{S2} \sigma_S (h - d)}{b_0 \cdot h^2 \cdot k_1 \cdot f_{bc}} \quad (5.51)$$

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

$$\alpha = \frac{k_2 - \sqrt{k_2^2 - 2k_2^2 \cdot \mu}}{k_2^2} \quad (5.52)$$

On pose:

$$\beta = 1 - 0.5k_2 \cdot \alpha \quad (5.53)$$

Le bras de levier z_{FRP} est égal à:

$$z_{FRP} = h \cdot \beta \quad (5.54)$$

La position de l'axe neutre est définie par:

$$y = \alpha \cdot h \quad (5.55)$$

Avec:

$$\sigma_{FRP} = E_{FRP} \cdot \varepsilon_{FRP} \quad ; \quad \varepsilon_{FRP} = \frac{h - y}{y} \varepsilon_C \quad (5.56)$$

Enfin la section du renfort en composite FRP sera:

$$A_{FRP} = \frac{M_R - A_{S2} \sigma_S (z_{FRP} - d'') - A'_S \sigma'_S (0.5k_2 \cdot y - d')}{\sigma_{FRP} \cdot z_{FRP}} \quad (5.57)$$

Validation de la présente méthode :

La présente méthode a été validée par une comparaison des résultats numériques obtenus avec le modèle du Hayder A. Rasheed 2003 et calcul selon le code ACI], avec $M_u = 21117 \text{ KN.m}$.

Tableau 5.7 : Caractéristiques et propriétés mécaniques des matériaux utilisés.

Caractéristique du matériau Béton :	Caractéristique de l'Acier de construction :	Caractéristique du renfort : Composite
$f_{bc} = 30 \text{ MPa}$	$E_s = 20.10^4 \text{ MPa}$	$E_{FRP} = 20.10^3 \text{ MPa}$
$\varepsilon_{bc} = 0.003$	$\sigma_s = 400 \text{ MPa}$	$M_u = 21117 \text{ KN.m}$
$b = 3500 \text{ mm}$	$\sigma_{s'} = 400 \text{ MPa}$	
$b_0 = 1200 \text{ mm}$	$A_s = 44800 \text{ mm}^2$	
$h = 1200 \text{ mm}$	$A_{s'} = 4800 \text{ mm}^2$	
$h_0 = 200 \text{ mm}$	$d = 1100 \text{ mm}$	
$k_1 = 0.85 ; k_2 = 0.85$	$d' = d'' = 100 \text{ mm}$	

Le moment de la table :

$$M_t = 0.85.30.3500.200(1100) - 44800.400(100) = 1,7843.10^{10} \text{ N.mm}$$

$$M_u = 21117 \text{ KN.m} > M_t = 17843 \text{ kN.m}$$

La table est entièrement comprimée. Le calcul du composite sera en décomposant la section en T de la manière suivante :

Moment équilibré par les débords :

$$M_d = (3500 - 1200).200.0,85.30(1000) = 1,173.10^{10} \text{ N.mm}$$

Donc:

$$A_{s1} = \frac{1,173.10^{10}}{400.1000} = 29325 \text{ mm}^2$$

Moment équilibré par la section $b_0 \times h$:

$$A_{s2} = 44800 - 29325 = 15475 \text{ mm}^2$$

$$M_R = 21117 - 11730 = 9387 \text{ KN.m}$$

Le moment réduit et le paramètre caractéristique sont calculés par les formules (5.51) et (5.52) :

$$\mu = \frac{9387.10^6 - 4800.400(1200 - 100) + 15475.400(1200 - 1100)}{1200.1200^2 \cdot 0,85.30} = 0.179$$

$$\alpha = 0.234 ; \beta = 0,901$$

On obtient sur le bras de levier z_{FRP} , la position de l'axe neutre par (5.54) et (5.55) :

$$z_{FRP} = 1200 \cdot 0,901 = 1080.64 \text{ mm} \text{ et } y = 1200 \cdot 0.234 = 280.85 \text{ mm}$$

Par les formules (5.56) on aura:

$$\varepsilon_{FRP} = \frac{1200 - 280.85}{280.85} \cdot 0.003 \Rightarrow \varepsilon_{FRP} = 0.009818$$

$$\sigma_{FRP} = 20000 \cdot 0,009818 \Rightarrow \sigma_{FRP} = 196,36 \text{ MP}_a$$

Finalement, la section du composite d'après la formule (5.57) sera :

$$A_{FRP} = \frac{9387.10^6 - 15475.400(981,64) - 4800.400(19,36)}{196,36 \cdot 1080,64} \Leftrightarrow A_{FRP} = 15455,74 \text{ mm}^2$$

La comparaison des calculs sont présentées dans le tableau(5.8) pour un modèle d'une poutre en Té en béton armé renforcée par composite en CFRP:

Tableau 5.8 : Comparaison des résultats avec différents modèles de calcul.

Modèle de calcul	La section du composite A_{FRP} (mm^2)
HayderA.Rasheed 2003	15932
Calcul selon le code ACI	15459,93
Présente méthode	15455,74

Paramètre influant sur le dimensionnement en flexion:

On s'intéresse dans cette étude sur l'influence des différents paramètres sur le dimensionnement dans une poutre en Té en béton armé non endommagée renforcée par une plaque en matériaux composites.

a) Effet de la résistance caractéristique du béton f_{c28} :

L'effet de la résistance caractéristique du béton sur le dimensionnement d'une poutre en T en béton armé renforcée en flexion par une plaque en composite est illustré dans la figure (5.22).

Nous pouvons constater que la résistance caractéristique du béton influe sur le dimensionnement et nous pouvons enregistrer des sections du composite plus grande lorsque la résistance caractéristique du béton diminue.

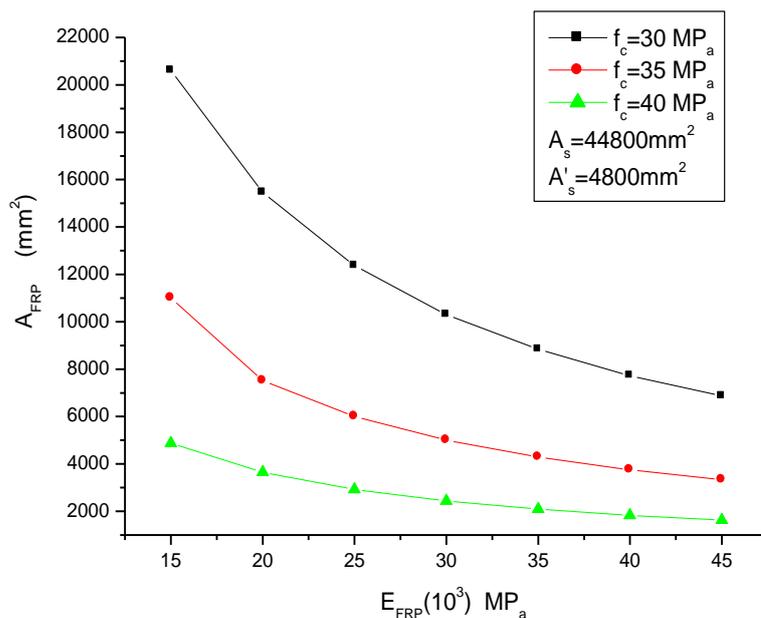


Figure 5.22 : Effet de la résistance caractéristique du béton sur le dimensionnement d'une poutre en T en béton renforcée en flexion par une plaque en composite CFRP.

b) Effet de la contrainte limite d'élasticité de l'acier σ_s :

L'influence des différentes valeurs de la contrainte limite d'élasticité de l'acier est présentée sur la figure (5.23). Nous pouvons dire que le dimensionnement du composite diminue lorsqu'il s'agit des valeurs grandes de la contrainte limite de l'acier.

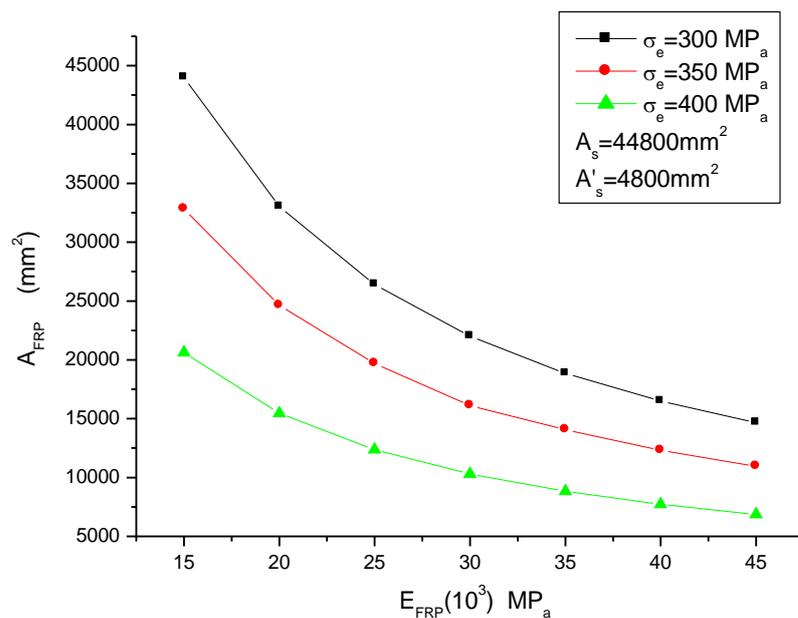


Figure 5.23 : Effet de la contrainte limite d'élasticité de l'acier sur le dimensionnement de la section du composite CFRP pour une poutre en T en béton armé.

c) *Effet de la déformation unitaire du béton ϵ_{bc} :*

La figure (5.24) montre l'influence de la variation de déformation unitaire du béton sur le dimensionnement de la poutre précédente qui diminue avec l'accroissement de la déformation unitaire du béton.

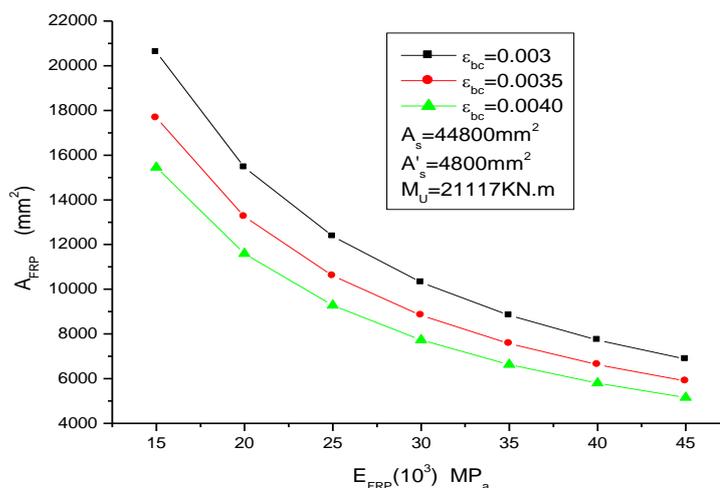


Figure 5.24 : Effet de la déformation unitaire du béton sur le dimensionnement d'une poutre en T en béton armé renforcée par composite CFRP.

d) Effet du taux de renforcement intérieur en acier:

La figure (5.25) montre l'influence de la variation du taux de renforcement pour une poutre en T en béton armé sur le dimensionnement du composite CFRP.

Nous pouvons enregistrer que la section du renfort diminue dans une poutre sur armée et croisse si elle est sous-armée.

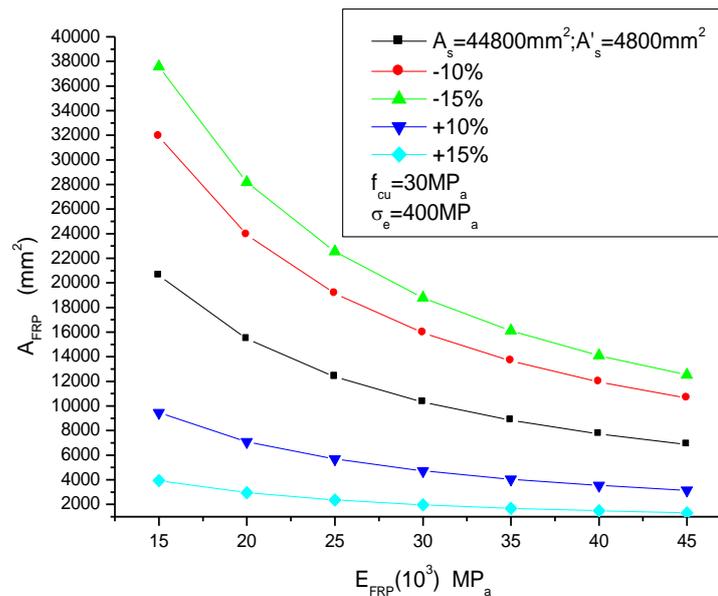


Figure 5.25 : Effet du taux de renforcement sur le dimensionnement d'une poutre en T en béton armé renforcée par CFRP.

Les poutres rectangulaires avec armatures comprimées et double renforce :

Considérons une section rectangulaire en béton armé de largeur b et de hauteur h , avec armature comprimée double renforcées par la plaque composite figure (5.6) :

- Par une traction longitudinale des aciers de section A_s et de hauteur « d » à la face la plus tendue.
- Par une compression longitudinale des aciers de section A'_s et de hauteur « d' » à la face la plus comprimée.
- Par une bande de lamelle composite de section A_F et de hauteur « h » à la face la plus tendue.

- Par une bande de lamelle composite de section A_{F_1} et de hauteur « h » à la face la plus comprimée
- Par une bande de lamelle composite de section A_{F_2} et de hauteur « h » à la face la plus comprimée

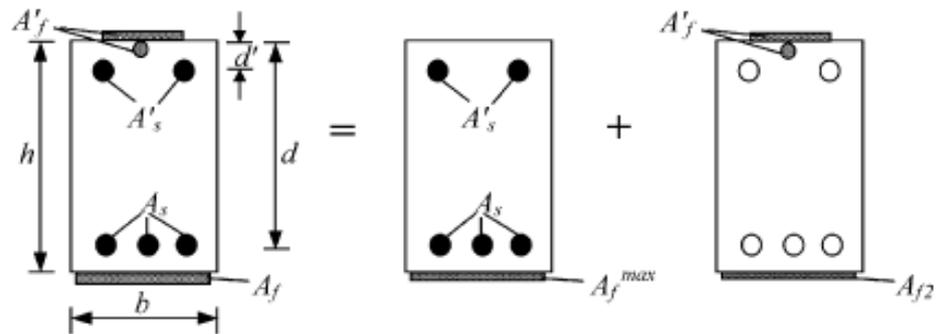


Figure 5.26 : Section rectangulaire avec armatures comprimées, double renforcée par CFRP

b) Equilibre des forces

$$C + C' = T_s + T_{FRP} \quad (5.58)$$

Soit :

C : La force de compression du béton ;

$$C = 0,8y.b.\sigma_{bc} \quad (5.59)$$

C' : La force de compression de l'acier ;

$$C' = A_s' . \sigma_s' \quad (5.60)$$

T_s : La force de traction de l'acier ;

$$T_s = A_s . \sigma_s \quad (5.61)$$

T_{FRP} : La force de traction des lamelles composite ;

$$T_{FRP} = A_{FRP} . \sigma_{FRP} \quad (5.62)$$

$$T_{FRP}' = A_{FRP}' \cdot \sigma_{FRP} \quad (5.63)$$

$$A_{FRP} = A_{FRP_{max}} + A_{FRP_2} \quad (5.64)$$

$$0,8y \cdot b \cdot \sigma_{bc} + A_S' \cdot \sigma_S' = A_S \cdot \sigma_S + A_{FRP} \cdot \sigma_{FRP} \quad (5.65)$$

$$A_{FRP} = \frac{0,8y \cdot b \cdot \sigma_{bc} + A_S' \cdot \sigma_S' - A_S \cdot \sigma_S}{\sigma_{FRP}} \quad (5.66)$$

On divise(5.66) sur b d :

$$\frac{A_{FRP}}{b \cdot d} = \frac{0,8y \cdot b \cdot \sigma_{bc}}{b \cdot d \cdot \sigma_{FRP}} + \frac{A_S' \cdot \sigma_S'}{b \cdot d \cdot \sigma_{FRP}} - \frac{A_S \cdot \sigma_S}{b \cdot d \cdot \sigma_{FRP}} \quad (5.67)$$

$$\rho_{FRP} = \frac{0,8y}{d} \frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{FRP}} + \rho_s' \frac{\sigma_S'}{\sigma_{FRP}} - \rho_s \frac{\sigma_S}{\sigma_{FRP}} \quad (5.68)$$

Soit :

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d}; \rho_s = \frac{A_s}{b \cdot d}; \rho_s' = \frac{A_s'}{b \cdot d} \quad (5.69)$$

b)L'équilibre des moment

$$M_1 = A_{FRP_{max}} \cdot \sigma_{FRP} (h - 0,4y) + A_S \cdot \sigma_S (d - 0,4y) + A_S' \cdot \sigma_S' (0,4y - d') \quad (5.70)$$

$$M_2 = A_{FRP} \cdot \sigma_{FRP} \cdot h \quad (5.71)$$

$$M_2 = M - M_1 \quad (5.72)$$

$$\frac{M}{b \cdot h^2 \cdot \sigma_{bc}} = \frac{A_S \cdot \sigma_S \cdot d}{b \cdot h^2 \cdot \sigma_{bc} \cdot d} (d - 0,4y) + \frac{A_{FRP} \cdot \sigma_{FRP} \cdot d}{b \cdot h^2 \cdot \sigma_{bc} \cdot d} (h - 0,4y) + \frac{A_S' \cdot \sigma_S' \cdot d}{b \cdot h^2 \cdot \sigma_{bc} \cdot d} (0,4y - d') \quad (5.73)$$

$$\frac{M}{b \cdot h^2 \cdot \sigma_{bc}} = \rho_s \frac{\sigma_S \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h^2} (d - 0,4y) + \rho_{FRP} \frac{\sigma_{FRP} \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h^2} (h - 0,4y) + \rho_s' \frac{\sigma_S' \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h^2} (0,4y - d') \quad (5.74)$$

On place (5.69) dans (5.71) et après la simplification on a :

$$\frac{M}{b \cdot h^2 \cdot \sigma_{bc}} = 0,8 \frac{y}{h} - 0,32 \frac{y^2}{h^2} + \rho_s \frac{\sigma_S \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h^2} (d - h) + \rho_s' \frac{\sigma_S' \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h^2} (h - d') \quad (5.75)$$

$$0,32\left(\frac{y}{h}\right)^2 - 0,8\frac{y}{h} + \left[\rho_s \frac{\sigma_s \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h} \left(1 - \frac{d}{h}\right) - \rho_s' \frac{\sigma_s' \cdot d'}{\sigma_{bc} \cdot h} \left(1 - \frac{d'}{h}\right) + \frac{M}{b \cdot h^2 \cdot \sigma_{bc}} \right] = 0 \quad (5.76)$$

$$0,32\left(\frac{y}{h}\right)^2 - 0,8\frac{y}{h} + Q_u' = 0 \quad (5.77)$$

Avec :

$$Q_u' = \frac{M}{b \cdot h^2 \cdot \sigma_{bc}} + \rho_s \frac{\sigma_s \cdot d}{\sigma_{bc} \cdot h} \left(1 - \frac{d}{h}\right) - \rho_s' \frac{\sigma_s' \cdot d'}{\sigma_{bc} \cdot h} \left(1 - \frac{d'}{h}\right) \quad (5.78)$$

D'après le diagramme de distribution des déformations On calcul ε_{FRP} :

$$\frac{\varepsilon_{bc}}{y} = \frac{\varepsilon_{FRP}}{h - y} \rightarrow \varepsilon_{FRP} = \varepsilon_{bc} \cdot \left(\frac{h}{y} - 1\right) \quad (5.79)$$

Donc on peut calculer σ_{FRP} par la loi de Hooke :

$$\sigma_{FRP} = \varepsilon_{FRP} \cdot E_{FRP} \quad (5.80)$$

$$\frac{\varepsilon_{bc}}{y} = \frac{\varepsilon_{FRP}}{h - y} \rightarrow \varepsilon_{FRP} = \varepsilon_{bc} \cdot \left(\frac{h}{y} - 1\right) \quad (5.81)$$

Donc la section du composite CFRP :

$$A_{FRP_{max}} = \frac{M - A_s \cdot \sigma_s (d - 0,4y) - A_s' \cdot \sigma_s' (0,4y - d')}{\sigma_{FRP} (h - 0,4y)} \quad (5.82)$$

Ou :

$$A_{FRP} = \frac{\rho_{FRP}}{b \cdot d} \quad (5.83)$$

Application :

Tableau 5.9 :Caractéristiques et propriétés mécaniques des matériaux utilisées

Caractéristique du matériau Béton		Caractéristique de l'Acier de construction			Caractéristique du renfort
b=400mm	$\sigma_{bc}=19.84\text{MPa}$	d=550 mm	$A_s=4826\text{mm}^2$	$\sigma_s'=\sigma_s=470\text{MPa}$	Ef =37.23 GPa
h=600mm	$\varepsilon_{bc}=0.003$	d'=50mm	$A_s'=1000\text{mm}^2$	$E_s=200000\text{ MPa}$	Mu=1400 KN.m

$$Q_u' = \frac{1400 \cdot 10^6}{400 \cdot (600)^2 \cdot 19,84} + \frac{4826 \cdot 470 \cdot 550}{400 \cdot 550 \cdot 19,84 \cdot 600} \left(1 - \frac{550}{600}\right) - \frac{1000 \cdot 470 \cdot 550}{19,84 \cdot 600 \cdot 550 \cdot 400} \left(1 - \frac{50}{600}\right)$$

$$Q_u' = 0,4392$$

$$\frac{y}{h} = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2(0,4392)}) \Rightarrow y = 488,56 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{FRP} = 0.003 \cdot \left(\frac{600}{488,46} - 1\right) \Rightarrow \varepsilon_{FRP} = 0.00068$$

Donc on peut calculer σ_{FRP}

$$\sigma_{FRP} = 68 \cdot 10^{-4} \cdot 37,23 \cdot 10^3 \Rightarrow \sigma_{FRP} = 25,47 \text{ MPa}$$

Donc la section du composite CFRP

$$A_{FRP \text{ MAX}} = \frac{1400 \cdot 10^6 - 4826 \cdot 470(550 - 0,4 \cdot 488,56) - 1000 \cdot 470(0,4 \cdot 488,56 - 50)}{25,47(600 - 0,4 \cdot 488,56)}$$

$$A_{FRP \text{ MAX}} = 51160 \text{ mm}^2$$

$$M_1 = 1309,79 \text{ kn.m}$$

$$M_2 = 90,21 \text{ Kn.m}$$

Conclusion:

Le rôle des matériaux composites dans le domaine du renforcement des structures de génie civil est incontestable. De nombreux travaux de recherche et des réalisations pratiques ont démontré l'efficacité de la technique de réhabilitation des bâtiments et des ouvrages d'art par le collage d'éléments de renforcement extérieur. L'utilisation de plus en plus fréquente des matériaux composites s'explique d'une part par leurs meilleures propriétés mécaniques et d'autre part, par le progrès dans les procédés de leur fabrication durant ces dernières décennies. Devenus plus accessibles sur un plan économique, les matériaux composites sont une solution très attractive pour répondre au besoin de renforcement des bâtiments et des ouvrages d'art. Le dimensionnement des matériaux composites pour des poutres en béton armé renforcées en flexion est important pour déterminer la section du renfort nécessaire, pour cela plusieurs méthodes ont été établis pour le calcul de la section du composite qui dépend de différents paramètres qui influent sur le dimensionnement de la poutre renforcée: la géométrie de la section, les caractéristiques des matériaux utilisées.

Conclusions et

Référence bibliographiques

Conclusions

Les ouvrages en béton armé demeurent en excellent état après plus de 50ans d'exploitation, leur durée de vie diminue suite à une pathologie structurelle issue des erreurs de conception, des défauts de résistance dus à un chargement excessif ou des dégradations de matériaux. Le renforcement des structures existantes adaptées à des contraintes d'exploitation additionnelles, implique un développement de méthodes nouvelles et innovantes parmi lesquelles se situe le renforcement par ajout de renforts composites collés extérieurement.

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels, ils apportent de nombreux avantages fonctionnels tel que : légèreté, résistance mécanique élevée, liberté de formes, ainsi qu'une maintenance réduite. Le contexte général du présent mémoire concerne le dimensionnement des poutres en béton armé non endommagée et endommagée renforcée en flexion et à l'effort tranchant par des plaques en matériaux composites.

Parmi la large gamme de composites existant, les composites à fibres de carbone sont les plus utilisés pour les applications de renforcement et de réparation d'ouvrage en béton en raison, notamment, de leurs caractéristiques mécaniques et physicochimiques. Nous avons mis en œuvre des méthodes de dimensionnement concernant les poutres rectangulaires et en Té en béton armé renforcée en flexion.

Le collage d'une plaque de matériaux composites sur les surfaces tendues ou les surfaces latérales est un moyen très efficace pour renforcer ou réparer des structures en béton armé. La présence de matériaux composites sur les surfaces tendue améliore considérablement la résistance ultime en flexion et la raideur structurale de poutre renforcée en diminuant la propagation de fissures.

Enfin, le dimensionnement des poutres en béton armé en flexion par la présente méthode a été fait sous un chargement statique ce qui exige des études complémentaires pour:

- Etudier le comportement des poutres renforcées par matériaux composites sous chargement dynamique.
- Améliorer la connaissance concernant la fiabilité et la durabilité des structures renforcées par composites.
- Pour un complément de cette étude analytique nous proposons d'établir une modélisation numérique basée sur la méthode des éléments finis.

Référence bibliographiques

- [1] AFGC, Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites, Recommandations provisoires, décembre 2003
- [2] Allahverdi A, Skvara F Acidic corrosion of hydrated cement based materials. Part 1. Mechanism of the phenomenon. Prague, Institute of Chemical Technology - Academy of Sciences of the Czech Republic, Ceramics-Silikaty, (2000). n° 44 (3), pp. 114-120.
- [3] AL-SULAIMANI G.J., KALEEMULLAH M., BASUNDUL I.A.,
- [4] RASHEEDUZZAFAR, Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behaviour and Strength of Reinforced Concrete Members, ACI Structural Journal, March-April 1990 Vol. 87, n°2, , pp. 220-231.
- [5] Andrade C, Castellote M, Alonso C, Gonzalez C Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion test, part I: comparaison between several methods of calculation, Material and structures 33,(2000). pp 21-28
- [6] BADOUX. M, Vulnérabilité Sismique du Bâti Existant Suisse. Bulletin Technique de la Suisse Romande- Ingénieurs et Architectes Suisses, (2001). 12, pp. 222-227.
- [7] BELHANNACHI H. Réhabilitation et Renforcement des Poteaux en Béton armé, Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, Faculté des Sciences de L'Ingénieur Département de Génie Civil(2009).
- [8] BOUALLEG S Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires, Mémoire de Magister, Université Mohamed Boudiaf de M'sila(2004).
- [9] BOUKHEZAR M. Réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composites, Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine Faculté des Sciences de L'Ingénieur Département de Génie Civil(2009).
- [10] Buyukozturk.O; OguzGunes; ErdemKaraca “Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites” Construction and Building Materials 18 (2004) 9–19
- [11] C. GIRARD La carbonatation du béton armé, Division ST – Technical Facilities Management (ST/TFM), CERN, Genève, Suisse., (2007),
- [12] CALGARO. J et LACROIX R. Maintenance et réparation des ponts, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.,(1997) p.11-19

- [13]CAROLIN, A. “Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements”, Doctorate Thesis, Lulea University of Technology, (2003) 178 p.
- [14]CHAI, Y. H., PRIESTLEY, M. J. N. et SEIBLE F. “Seismic retrofit of circular bridge columns for enhanced flexural performance”, ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 5, (1991) pp. 572-584
- [15]EL HOUSSAIN Rochdi, Contribution mécanique de dalles en béton armé renforcées par matériaux composites, thèse de doctorat, L’université Claude Bernard- Lyon 1, (2004),233p.
- [16]Elsen J., Jacobs J. et Vyncke J. Dégradation du béton par les sulfates: phénomène révolu ou à venir ? Bruxelles,CSTC-Magazine. (1996)
- [17]Elsen J., Jacobs J. et Vyncke J Dégradation du béton par les sulfates: phénomène révolu ou à venir ? Bruxelles,CSTC-Magazine(1996).
- [18]Externallybonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report, Fédération internationale de béton, Bulletin 14, 2001, 284 p. ISBN 2-88394-055-X.
- [19] Ferrier E Comportement de l’interface composite-béton sous des sollicitations de fluage thermo stimulé et en fatigue oligocyclique. Application au calcul prévisionnel de la durabilité de poutres BA renforcées, thèse de doctorat, Université Lyon1(1999).
- [20]Gao.Bo; Christofer.K.Y.Leung; Jang-Kyo Kim ; "Failure diagrams of FRP Strengthened RC beams"; Composite Structures 77(2007) p.493-508
- [21] Grace N. F. ;A. K. Soliman ;G. Abdel-Sayed ;K. R. Saleh; “Behavior and Ductility of Simple and Continuous FRP Reinforced Beams”; J. Composites for Construction, Volume 2, Issue 4, pp. 186-194 (November 1998).
- [22]Groupe de travail AGGC. Réhabilitation du Béton Armé Dégradé par la Corrosion, Documents Scientifiques et Techniques. (2003)
- [23]GUIDE FABEM, Traitements des Fissures, Bétons et Maçonnerie, Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP), France. (2013),
- [24]HAMELIN, P. “Renforcement des ouvrages d’art par matériaux composites”, AM 5 615, Technique de l’ingénieur, Traité Plastiques et Composites, (2002) Vol. AM 6.
- [25]Hicham BELHANNACHI, Réhabilitation et renforcement des poteaux en béton armé (juillet 2009)
- [26]HWANG, S.K. et YUN, H-D. “Effects of transverse reinforcement on flexural behaviour of high-strength concrete columns”, Engineering Structures, (2004) Vol. 25, pp. 1-12.

- [27] Ir C. Ployaert., , La corrosion des armatures des bétons armés et précontraints, Bulletin de technologie, Febelcem Fédération de l'Industrie Cimentière Belge. (2008)
- [28] J.M.BERTHELOT, Matériaux Composites: Comportement Mécanique et Analyse des Structures, TEC et DOC 4eme édition, 2002.
- [29] KELLER T., TIRELLI T., ZHOU A;W,. Tensile Fatigue Performance of Pultruded Glass Fiber Reinforced Polymer Profiles, Composite Structures 68(2005), pp. 235-245
- [30] L'HERMITE, R. "L'application des colles et résines dans la construction", Annales de l'ITBTP, série béton et béton armé, N° 239, Novembre 1967.
- [31] LUYCKX, J. "Composites à fibres de carbone dans le génie civil", Technique de l'ingénieur, Traité Plastiques et Composites, (1999) AM 5 620.
- [32] Maamoun SAADE Étude du comportement des voûtes en maçonnerie renforcées par matériaux composites – application aux ouvrages d'assainissement, These de doctorat, Université d'Artois, (2012). 184 p.
- [33] Monti, G and Barbato, M Fiber section of FRP strengthened RC beam in flexure, shear and confinement, Proceedings of the 6 th International Symposium on FRP Reinforcement for concrete Structures, Singapore. (2003).
- [34] Nanni, A and Norris, M, S. FRP jacketed concrete under flexure and combined flexure-compression, Construction and Building Materials, Volume 9, Issue 5, October 1995, Pages 273-281
- [35] National Information Service for Earthquake Engineering), Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center University of California, Berkeley (nisee.berkeley.edu).
- [36] PANTELIDES, C., DUFFIN, J., et CERCONI, L. "Phase II: seismic rehabilitation of concrete bridges, Civil & Environmental Engineering Department, University of Utah, Salt Lake City, Utah, Report N°. UT-02.14.(2002)
- [37] PERRIER R., HAMELIN P.. Ouvrage D'art Utilisant des Matériaux Composites. IREX, France, (1996) No. 6, p.8-32, 88-114
- [38] PRIESTLEY M.J.N., SEIBLE F., CALVI G.M., – Seismic Design and Retrofit of Bridges – Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. (1996) 686p
- [39] PRIESTLEY, M. J. N., SEIBLE, F., Xiao, Y. et VERMA, R. "Steel jacket retrofitting of reinforced concrete bridge columns for enhanced shear strength- Part I: Theoretical considerations and test design", ACI Structural Journal, (1994 a) Vol. 91, No. 4, pp. 394-405.

- [40] RAPHAELE SADONE Comportement de Poteaux en Béton Armé Renforcés par Matériaux Composites et Soumis à des Sollicitations de Type Sismique et Analyse D'éléments de Dimensionnement, Thèse de Doctorat, L'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, l'Université Paris-Est(2012).
- [41] RESSE C. et VENAUT M., Projection des Mortiers Béton et Plâtres, Techniques et Applications Bâtiment et TP, 1981.
- [42] Riad BENZAID, Habib Abdelhak MESBAH, Nasr-Eddine CHIKH Contribution à l'Etude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Eléments Structuraux Linéaires en Béton.,(2013)
- [43] ROBERT. L., Déformation Instantanées et différées des bétons à hautes performances, Laboratoire central des ponts et chaussées. (1996)
- [44] SCHNEIDER, G. "Résines Vinylesters", Technique de l'ingénieur, Traité Plastiques et Composites, (1993) A 3 450.
- [45] SETRA, Service D'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements,– Guide Méthodologique. Diagnostic et Renforcement Sismiques des Ponts Existants - édité par le SETRA, Collection les Outils. (2011)
- [46] SMITH, S.T. et TENG, J.G. "FRP-strengthening RC beams. I: review of debonding strength models", Engineering Structures, (2002) Vol. 24, pp. 385-395.
- [47] Systèmes de renforcement structuraux SikaCarboDur – Technologies et concepts », Documentation Technique SIKA.
- [48] TENG, J.G., CHEN, J.F., SMITH, S.T. et LAM, L "FRP strengthened RC structures", John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, . (2002) 245 p.
- [49] Toutanji. Houssam, LiangyingZhao, and Eugene Anselm ; "Verifications of Design Equations of Beams Externally Strengthened with FRP Composites"; J. Composites for Construction, (May/June 2006). Volume 10, Issue 3, pp. 254-264
- [50] VENUAT M, La pratique des ciments mortier et béton, Moniteur technique, éditions du moniteur, 1989
- [51] Xiao, Y and Ma, R Seismic Retrofit of RC Circular Columns Using Prefabricated Composite Jacketing, Journal of Structural Engineering, Vol. 123, Issue 10 (October 1997)