

République Algérienne Démocratique et Populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics
National School of Built and Ground Works Engineering
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Code :

Mémoire de Master

*Pour l'Obtention du Diplôme
De Master des Travaux Publics
Option matériaux & structures*

Thème

**AUGMENTATION DE LA CAPACITE PORTANTE DES
POUTRES DE PONT EN BETON ARME PAR
L'UTILISATION DES MATERIAUX COMPOSITES**

Proposé par : M. HEMAIDI ZOURGUI NADJIB

Présenté par :
HOUTI Mohamed

Encadré par :
M. HEMAIDI ZOURGUI NADJIB

Promotion 2015

École Nationale Supérieure des Travaux Publics. Garidi. Kouba.

Adresse : Rue SIDI GARIDI B.P.32 VIEUX COUBA – 16051.ALGER*
FAX : 021 28 87 61
Tel : 021 28 90 37 – 021 28 68 38

Site web : www.enstp.edu.dz
Email : enstp@enstp.edu.dz

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

DÉDICACES



Avant tout, je tiens tout d'abord de remercier Allah m'avoir donné

le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail ; que je dédie :

A ma chère mère, À la mémoire de ma mère à qui je penserai jusqu'à la fin des temps et qui est toujours présente et restera présente dans mon cœur. A mon cher père, aucune dédicace ne saurait exprimer l'affection et l'amour que j'éprouve envers vous. Puisse ce travail être une légère récompense de vos soutiens moraux et tous vos sacrifices pour assurer mon bien être et mon éducation. Que dieu vous garde pour nous et vous accorde la santé et le bonheur. Merci du fond du cœur.

À ceux que j'aime et que j'adore :

À Mes chères sœurs et mes chers frères

À mon ami Mohamed BELKBIR et toutes mes amis de l'ENSTP.

À tous mes proches et tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire.

À vous...Enfin, à tous ceux qui m'aiment de près et de loin.

MERCI

HOUTI Mohamed

Remerciements



Tout d'abord, nous tenons à remercier dieu de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous citons nommément :

- A notre encadreur **Mr HEMAIDI ZOURGUI Nadjib** pour avoir accepté de nous prendre en charge.*
 - A tout le personnel de l'ENSTP, qui nous ont aidé et enrichi nos connaissances.*
 - Nous tenons également à remercier l'ensemble des étudiants de l'ENSTP pour toutes les informations qu'ils ont apporté à notre travail. Durant les cinq ans de notre formation.*
 - Aux personnes de la bibliothèque et centre de calcul.*
 - Nos remerciements s'adressent, également, aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.*
- Enfin, Nos plus vifs remerciements s'adressent aussi à tous ceux qui nous ont aidés, encourager et nous ont soutenus.*

ملخص:

يعالج هذا التقرير تقوية البنيات الخرسانة المسلحة باستعمال الألياف التدميمية، ومن أجل هذا قمنا بدراسة مقارنة بين الدعامات مدعمة بألياف الكربون وغير مدعمة، وتهدف هذه الدراسة إلى تحديد ما إذا كانت ألياف الكربون لها ميزات مثيرة للاهتمام. الجزء الأول من هذه الدراسة هو إجراء بحوث الببليوغرافية على المواد المركبة. ولتحديد أبعاد لهيكل تعرض لشحنات معينة يتم تكرار هذه الخطوة مع عدة فرق مكونة من الألياف من الكربون باستعمال نمذجة رقمية بواسطة برنامج . AUTODESK ROBOT

الجزء الأخير من التقرير يتعلق بمقارنة النتائج الرقمية المتحصل عليها مع دراسة تجريبية من الحزم معززة بالكربون والألياف الطبيعية تخضع للاختبارات الانحناء.

وأظهرت هذه الدراسة تأثير مفيد من المواد المركبة على الحد من الانحرافات والتشوهات في الخرسانة المسلحة.
كلمات البحث: دعامة، خرسانة مسلحة، تقوية، مواد مركبة، ألياف الكربون، والنمذجة العددية،

Résumé :

Ce rapport traite sur le renforcement de structures en béton armé à l'aide de bandes de renfort. Une étude comparative est menée les poutres renforcées et non en fibres de carbone. Cette étude a pour objectif est de déterminer si les renforts de fibres de carbone comportent des caractéristiques intéressantes. La première partie de l'étude consiste à faire une recherche bibliographique sur les matériaux composites.

On utilise le renfort en fibre de carbone pour dimensionner une structure soumise à un chargement donné. Cette structure renforcée à l'aide de fibres de carbone est ensuite simulée numériquement. Cette étape est répétée avec plusieurs bandes composées de fibres de carbone. L'étude numérique consiste en premier lieu en une modélisation des poutres en béton armé renforcées par un tissu à base de fibre de carbone par l'utilisation du logiciel **AUTODESK ROBOT ANALYSIS**

La dernière partie de ce rapport concerne une comparaison entre les résultats numériques qu'on a obtenus avec une étude expérimentale des Poutres renforcées par des renforts de fibres de carbone et naturelles soumises à des essais de flexion.

Cette étude a montré l'effet bénéfique des matériaux composites sur la réduction des flèches et les déformations dans les poutres en béton armé.

Mots clés : Poutre, Béton armé, Renforcement, matériaux composites, Fibres de carbone, modélisation numérique.

Abstract:

This report focuses on the strengthening of reinforced concrete structures with reinforcing strips. A comparative study is conducted between the beams-reinforced with fiber of carbon and beams not reinforced. This study aims to determine if reinforcements with fiber of carbon have interesting properties.

The first part of the study concerns a bibliographic about composites materials; we use the reinforcement of carbon fiber for designed a loaded structure. This reinforced structure using carbon fiber is then numerically simulated. In this work, we used a finite element program **Autodesk robot** to model the strengthened RC beams.

The last part of this report concerns a comparative study. We compared our results with those obtained on the laboratory. The behavior of reinforced concrete beams unreinforced, reinforced with carbon fiber reinforcements and natural is compared by bending tests. It aims at showing if the reinforcement with carbon strips is a valuable solution in the civil engineering area.

This study showed the beneficial effect of composites on the reduction of arrow and strains in concrete steel beams.

Keywords: Beam, Reinforced concrete, strengthening, composites materials, Carbon fibers, numerical modeling.

SOMMAIRE

CHAPITRE N° :	Page
INTRODUCTION GENERALE :	
1. INTRODUCTION.....	1
2. PROBLEMATIQUE	1
3. HISTORIQUE.....	2
4. OBJECTIF DE L'ETUDE.....	3
5. PRESENTATION DE L'ETUDE.....	3
CHAPITRE I : DESORDRES ET PATHOLOGIES DES OUVRAGES EN BETON ARME	
I.1. INTRODUCTION.....	4
I.2. ACTIONS ET PATHOLOGIES AGISSANTS SUR LES OUVRAGES D'ARTS.....	4
I.2.1 Action des eaux	4
I.2.2. Attaque du béton par les sulfates et par l'acide sulfurique.....	5
I.2.3.L'alcali-Réaction	5
I.2.4.Pénétration des chlorures	6
I.2.5.Progression de la carbonatation	7
I.2.6.Corrosion des armatures métalliques.....	7
I.2.7. Le Choc	8
I.2.8.Action Sismique	8
I.2.9.La Fatigue	9
I.2.10.Le Retrait du Béton	9
I.2.11.Les dégradations liées au gel du béton	9
I.2.12.Défauts d'exécution	10
I.3.LES DEGRADATIONS	10
I.3.1.La fissuration	10
I.3.2.Autres Désordres.....	11
I.4.CONCLUSION	13
CHAPITRE II : TECHNIQUES DE RENFORCEMENT DES OUVRAGES EN BETON ARME	
II.1.INTRODUCTION	14
II.2.RAISONS D'UN RENFORCEMENT	14
II.3.DIFFERENTES SOLUTIONS TECHNIQUES DE REPARATION ET DE RENFORCEMENT DES OUVRAGES EN BETON	14
II.3.1.Réparation des désordres superficiels	14
II.3.2.Traitement des fissures	15
II.3.3.Méthode traditionnelle d'augmentation des sections avec ou sans armatures	16
II.3.4.Renforcement des structures par précontrainte additionnelle	16

II.3.5. Protection des bétons par application de produits à la surface du parement	16
II.3.6. Méthode d'adjonction des platines en acier	17
II.3.7. Béton projeté	17
II.3.8. Réparation des ouvrages en béton armé dégradés par corrosion des armatures	18
II.3.9. Renforcement par collage de tissus composites	20
II.4. <i>COMPARAISON ENTRE LE RENFORT AVEC DES LAMELLES COMPOSITES ET LE RENFORT AVEC DES PLATINES EN ACIER</i>	21
II.5. <i>CONCLUSION</i>	22

CHAPITRE III : MATERIAUX COMPOSITES

III.1. <i>INTRODUCTION</i>	23
III. 2. <i>HISTORIQUES</i>	23
III. 3. <i>DEFINITION DES MATERIAUX COMPOSITES</i>	24
III. 4. <i>LA COMPOSITION DES MATERIAUX COMPOSITES</i>	24
III.4.1. <i>Les fibres ou renfort</i>	24
III.4.1.1. Formes des renforts	25
III.4.1.2. Types des fibres	26
A. Fibre de verre	26
B. Fibre de carbone	27
C. Fibre d'aramide	30
D. Fibre de bore	30
E. Fibre de silice (ou de quartz)	30
F. Fibres de polyéthylène de haut module	30
III.4.1.3. Caractéristiques moyennes des fibres et renforts	30
III.4.1.4. Architecture des renforts	31
III.4.2. Les charges	33
III. 4.3. <i>La matrice</i>	34
III. 4.3.1. Les résines thermodurcissables	34
III. 4.3.2. Les matrices thermoplastiques	37
III. 4.4. Principales combinaisons de résines et de renforts	38
III. 5. <i>LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DES MATERIAUX COMPOSITES</i>	39
III. 6. <i>MISE EN OUVRE</i>	39

III.6.1.Préparation de la surface du béton	40
III.6.2.Adhésif	40
III.6.3.Préparation de la surface du renfort	41
III. 7. <i>EFFETS ATTENDUS DU RENFORCEMENT</i>	41
III.7.1.Le test en flexion	42
III.8. <i>CONCLUSION</i>	43
 CHAPITRE IV : L'INDUSTRIE ET LE MARCHE DES MATERIAUX COMPOSITES	
IV.1. <i>INTRODUCTION</i>	44
IV.2. <i>PRINCIPALES RAISONS DE LEURS IMPLANTATION</i>	44
IV.3. <i>EXEMPLES DE SECTEURS D'APPLICATION DES COMPOSITES</i>	45
IV.3.1. Construction aéronautique	45
IV.3.2.Construction automobile	45
IV.3.3.L'utilisation dans le domaine de génie civil	46
IV.3.4. Loisirs et sports	46
IV.3.5. Exemples d'autres domaines d'utilisation des composites	46
IV.4. <i>TECHNOLOGIES DE TRANSFORMATION</i>	47
IV.4.1.Technologies manuelles de transformation	47
IV.4.2.Procédés de transformation par moulage	48
IV.4.3.Procédé de transformation en continu	48
IV.4.4.Procédés de fabrication des formes de révolution	49
IV.4.5.Procédés innovants	49
IV.4.6.Répartition des procédés de transformation	49
IV.5. <i>LES MARCHES D'APPLICATION DES COMPOSITESDANS LA CONSTRUCTION CIVILE</i>	50
IV.5.1.Aperçu du marché mondial des composites	50
IV.5.2.Répartition par marchés d'application	51
IV.6. <i>CONCLUSION</i>	52
 <i>RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE RENFORCEMENT PAR MATERIAUX COMPOSITES</i>	
1. <i>INTRODUCTION</i>	53
2. <i>RESULTATS EXPERIMENTAUX</i>	53
2.1. <i>L'UTILISATION DES NOUVEAUX MATERIAUX COMPOSITES POUR REEMPLACER L'ACIER</i>	53
a). Renforcement en flexion	53
b).Renforcement au cisaillement	57
2.2. <i>CONTRIBUTION DES BANDES DE TFC A LA RESISTANCE A L'EFFORT TRANCHANT DE POUTRE EN BA</i>	57
3. <i>RESULTATS NUMERIQUES</i>	59

4. CONCLUSION	64
---------------------	----

CHAPITRE V : COMPORTEMENT DES POUTRES EN BETON ARME

V.1. INTRODUCTION	65
V.2.COMPORTEMENT GLOBAL D'UNE POUTRE EN BA	65
V.3.MECANISMES DE RUPTURE D'UNE POUTRE EN BETON ARME	66
V.4. CLASSIFICATION DES MODES DE RUPTURE	66
V.4.1.Rupture flexionnelle	66
V.4.2.Rupture par cisaillement	67
V.4.3.Ruptures par décollement de l'extrémité	67
V.4.4.Séparation du béton d'enrobage	68
V.5. COMPORTEMENT DES POUTRES EN BETON ARMÉ RENFORCÉES PAR DES FIBRES DE CARBONE	68
V.5.1.La résistance du renfort	68
V.6. L'ELABORATION DES MODELES DE CALCUL	69
V.6.1. Les caractéristiques des matériaux utilisés	69
V.6.2. Les Modèles adoptés pour cette étude	70
V.6.3. La poutre témoin en béton armé	71
V.6.4. Les poutres renforcées	71
V.7. CONCLUSION	72

CHAPITRE VI : RESULTATS NUMERIQUES ET INTERPRETATIONS

VI.1.INTRODUCTION	73
VI.2.LES RESULTATS DE L'ETUDE NUMERIQUE	73
VI.2.1.Poutre témoin en béton armé	73
VI.7. Poutres renforcées.....	74
VI.3. COMPARAISON DES RESULTATS NUMERIQUES OBTENUS AVEC LES RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	76
VI.4. CONCLUSION	78

CONCLUSIONS GENERALE ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSIONS GENERALE	79
----------------------------	----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTE DES FIGURES

<i>FIGURE N° :</i>	<i>Page</i>
Fig I.1 : Pont à haubans	4
Fig I.2 : Schématisation des zones d'attaque du béton par l'eau de mer	4
Fig I.3 : Phénomène d'affouillement au pied d'une pile de pont	5
Fig I.4 : RN 72 PK 10+400	5
Fig I.5 : Dommages causés par la thaumasite	5
Fig I.6 :Léffritement et l'efflorescence	5
Fig I.7 : Déplacement sur appui du au allongement du tablier.....	6
Fig. I.8 : Rupture d'un acier passif	6
Fig. I.9 : Piqure profonde causée par une attaque de chlorure	6
Fig. I.10 : Piqure profonde causée par une attaque de chlorure	6
Fig. I.11 : Mécanisme de carbonatation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	7
Fig. I.12 : Exemple d'armatures apparentes corrodées ...	7
Fig. I.13 : Volume relatif des produits d'oxydation du fer	7
Fig. I.14 : Représentation schématique du mécanisme de la corrosion des aciers d'armature dans le béton	7
Fig. I.15 : Les phases de corrosion	8
Fig. I.16 : Les différentes dégradations causées par le choc	8
Fig. I.17 : Exemples des dommages induits par le séisme	9
Fig I.18 : Fragment de pâte de ciment contenant un capillaire et deux bulles d'air	10
Fig I.19 : Dégradation du béton sous l'effet du gel-dégel	10
Fig I.20 : Facteurs d'influences sur la dégradation des ouvrages en BA	10
Fig I.21 : Poutre de tablier	11
Fig I.22 : Efflorescence de dalle du pont	11
Fig I.23 : Efflorescence au niveau de chevêtre	11
Fig I.24 : Epaufrure due par pression de corrosion	11
Fig I.25 : Epaufrure cause par le choc	11
Fig. I.26 : Effet de la concentration en NaCl sur l'écaillage de surface	12
Fig. I.27 : Mécanisme de formation des 'écailles'	12
Fig I.28 : Délamination à la base d'une poutre en béton armé	12
Fig I.29 : Délamination dues à la corrosion dans un caisson	12
Fig. I.30 : Défaut de mal exécution des travaux	12
Fig. I.31 : Eclatement localisé	13
Fig. I.32 : Ségrégations.....	13
Fig II.1 :Projection Par Voie Humide.....	17
Fig II.2 :Projection Par Voie Sèche.	18
Fig II.3 : Représentation schématique d'un système de protection	19
Fig II.4 : Lamelles.....	20
Fig II.5 : Fibres de carbone en lamelles	21
Fig II.6: Sika® Carbo Shear® L	21

Fig II.7 : Tissus unidirectionnels	21
Fig II.8. Comparaison entre le renfort avec des lamelles composites et le renfort avec des platines en acier	22
FigIII.1 : Arborescence des matériaux de synthèse	24
FigIII.2 : Principaux matériaux de renfort	25
FigIII.3 : Eléments de la forme linéique	25
FigIII.4 : Eléments composants de la forme surfaciques	26
FigIII.5 : Eléments composants de la structure multidimensionnelle	26
FigIII.6 : Fibre de verre	26
FigIII.7 : Fibre de carbone	27
FigIII.8 : production de fibres de carbone	27
FigIII.9 : Vue d'un tissu	28
FigIII.10 : Courbes contrainte-déformation typiques des composites et l'acier doux	28
FigIII.11 : Différents types de Composite	29
FigIII.12 : Fibre d'aramide	30
FigIII.13 : Renfort unidirectionnels	31
FigIII.14 : Toile ou taffetas	31
FigIII.15 : Serge	32
FigIII.16 : Satin	32
FigIII.17 : Tissu multiaxial	32
FigIII.18 : Tissu 3D ou tresse	32
FigIII.19 : Tissu hybride	32
FigIII.20 : Tissu taffetas	32
FigIII.21 : Tissu Serge 2*2	32
FigIII.22 : Tissu Satin de 5	32
FigIII.23 : Architectures de renforcement	33
FigIII.24 : Composition d'une résine polyester	35
FigIII.25 : Structure moléculaire d'une résine vinylester	35
FigIII.26 : Formulation générale de la résine DGEBA	36
FigIII.27 : Formule chimique du polyamide 6	37
FigIII.28 : Formule chimique du polyamide 12	37
FigIII.29 : Comportement en flexion des composites avec différent renforts fibreux	39
FigIII.30 : Mise en œuvre de bandes de renforts sur un pont	42
FigIII.31 : Renforcement d'une cheminée par des bandes de renfort	42
FigIII.32 : Mise en œuvre de bandes de renfort en sous face d'une dalle et sur des poutres	42
FigIII.33 : Contrainte de flexion appliquée sur une éprouvette de section homogène	42
FigIII.34 : Schéma de renforcement d'une poutre soumise à la flexion	42
FigIII.35 : Vue du pont durant les opérations de renforcement	42
FigIII.36 : Renforcement de la pile de pont par TFC	42
FigIII.37 : Poutre renforcée par TFC	42
Fig IV.1 : Les secteurs utilisateurs(en valeurs, en $\%$)	44
Fig IV.2 : L'utilisation des composites dans les constructions aéronautiques	45
Fig IV.3 : Renforcement d'infrastructures existantes de bâtiment, ouvrages d'art et génie civil : Poutres / poteaux / trémies / dalles / voiles	46
Fig IV.4 : Renforcement d'un ouvrage d'art	46
Fig IV.5 : TFC pour le renforcement de structures	46
Fig IV.6 : Renforcement d'un bâtiment	46
Fig IV.7 : Utilisation des matériaux composites dans le transport	47
Fig IV.8 : Principe de moulage au contact	47

Fig IV.9 : Principe du drapage autoclave.....	48
Fig IV.10 : La pultrusion.....	48
Fig IV.11 : Principe de l'enroulement filamentaire.....	49
Fig IV.12 : Un marché très diversifié pour une large gamme de produits.....	50
Fig IV.13 : Marché mondial des renforts en fibres de verre.....	51
Fig IV.14 : Parts de marché européen des renforts en fibres de verre.....	51
Fig IV.15 : Budget investi en M€ et nombre de projets.....	51
Fig.1 : Ancrage avec cornières d'acier profilées en L.....	54
Fig.2 : Prolongement de la plaque jusqu'aux appuis.....	54
Fig.3 : Ancrage avec boulons.....	54
Fig.4 : Influence du nombre de lits de lamelle.....	55
Fig.5 : Courbes force-flèche des différents types de renforcements.....	56
Fig.6 : Courbes force-déformation des aciers pour poutres réparées et renforcées.....	56
Fig.7 : Mode de renforcement.....	57
Fig.8 : Courbes force-flèche à mi- travée des poutres renforcées.....	57
Fig.9 : Décollement de type peeling-off.....	57
Fig.10 : Décollement dû à une surface concave.....	57
Fig.11 : Comportement global de la poutre de référence et les poutres renforcées par collage de bandes inclinées.....	58
Fig.12 : Modèle expérimental.....	58
Fig.13 : renfort en carbone décollé après un essai de flexion.....	58
Fig.14 : une poutre dont le renfort en fibres de carbone s'est décollée.....	58
Fig.15 : Renfort composé de fibres ayant rompu lors d'un essai de flexion.....	58
Fig.16 : Résultats des essais sur les poutres sans renfort.....	59
Fig.17 : Résultats des essais sur les poutres avec des renforts en fibres de carbone.....	59
Fig.18 : Modèle en éléments finis (CASTEM2000) adopté.....	60
Fig.19 : Cas de chargement dans modèle expérimental.....	60
Fig.20 : Détails de la modélisation effectuée avec ANSYS.....	61
Fig.21 : Disposition des différents éléments constituant la poutre et les différents renforcements.....	61
Fig.22 : Disposition des armatures de a) Poutre à section pleine, b) poutre à section évidée.....	62
Fig.23 : Conditions aux limites du modèle éléments finis.....	63
Fig.24 : Dimensions de la poutre et dispositions des renforcements.....	63
Fig.25 : Géométrie du modèle sur ANSYS, considérant la symétrie.....	64
FigV.1 : Plaque de composite collée sur une poutre en béton armé.....	65
FigV.2 : Distribution à la rupture des déformations et contraintes.....	66
FigV.3 : Poutre en BA renforcée - Rupture de PRF.....	67
FigV.4 Courbes de charge- flèche pour poutres en BA renforcées et non renforcées.....	67
FigV.5 : Poutre BA renforcée.....	68
FigV.6 : Poutre en BA renforcée - séparation de béton d'enrobage.....	68
FigV.7 : Loi de comportement du renfort.....	69
FigV.8 : le ferrailage adopté pour les poutres.....	70
FigV.9 : Lamelle sika carbodur.....	70
FigV.10 : Sika Wrap (tissu monodirectionnel).....	70
FigV.11 : Schéma statique de chargement.....	71
FigV.12 : Le modèle de la poutre témoin.....	71
FigV.13 : Le modèle de la poutre renforcée RA1.....	71
FigV.14 : Le modèle de la poutre renforcée RA2.....	72
FigVI.1 : Courbe force-flèche à mi- travée de la poutre témoin.....	73

FigVI.2 : Courbe force-flèche à L/3 de la poutre témoin.....	73
FigVI.3 : La distribution des contraintes de traction et de compression dans le béton De TM (Sous une charge de 40 kN).....	74
FigVI.4 : Courbe force-flèche à mi- travée et à L/3 de la poutre renforcée RA1.....	74
FigVI.5 : La distribution des contraintes de traction et de compression au niveau de la poutre renforcée RA1.....	74
FigVI.6 : Courbe force-flèche à mi- travée et à L/3 de la poutre renforcée RA2.....	75
FigVI.7 : La distribution des contraintes de traction et de compression au niveau de la poutre renforcée RA2.....	76
FigVI.8 : La poutre témoin en béton armé.....	76
FigVI.9 : Diagramme force-flèche à mi- travée de la poutre témoin (num-exp).....	76
FigVI.10 : La poutre renforcée RA1.....	77
FigVI.11 : Diagramme force-flèche à mi- travée de la poutre RA1 (num-exp).....	77
FigVI.12 : Diagramme force-flèche à mi- travée de la poutre RA2 (num-exp).....	78

LISTE DES TABLEAUX

<i>TABLEAU N° :</i>	<i>Page</i>
Tab III.1 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre.....	27
Tab III.2 : Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone	28
Tab III .3 : Exemple de caractéristiques mécaniques des fibres de carbone de composites unidirectionnels comparées à celles de l'acier.....	28
Tab III.4 : Caractéristiques moyennes des fibres.....	30
Tab III.5 : résumé des principales propriétés.....	31
Tab III.6 : Performances comparées des différents types d'architecture.....	33
Tab III.7 : Principales différences entre matrices TP et TD.....	34
Tab III.8 : Les avantages et les inconvénients Polyesters insaturés.....	35
Tab III.9 : Les avantages et les inconvénients de l'époxyde.....	35
Tab III.10 : Tab III.10 : Propriétés mécaniques des résines époxydes.....	36
Tab III.11 : Caractéristiques mécaniques des résines thermodurcissables	36
Tab III.12 : Les avantages et les inconvénients Polyuréthanes et polyurées.....	36
Tab III.13 : Matrices TD.....	37
Tab III.14 : Caractéristiques du polyamide 6 et du polyamide 12	38
Tab III.15 : Matrices TP	38
Tab III.16 : Tableau de synthèse de l'utilisation des résines et renforts.....	38
Tab IV.1 : Répartition des procédés de transformation.....	50
Tab V.1 : Présentation des sollicitations dans les 3 types de poutres.....	65
Tab VI.1 : Tableau récapitulatif de quelques résultats importants.....	78

LISTE DES SYMBOLES

NOTATIONS :

f_{c0} : Résistance à la compression du béton non renforcé à 28 jours

f_{cc} : Résistance à la compression du béton après le renforcement

$\epsilon_{t, rup}$: allongement ultime de la fibre de carbone donné par le fabricant

$\epsilon_{fu, rup}$: allongement ultime de la fibre de carbone donné trouvé expérimentalement

E/C : Le rapport l'eau ciment

ρ : La densité

k_1 : Coefficient d'efficacité de renforcement

d : Diamètre de l'éprouvette

f_l : Pression de confinement latéral

C_j : Module de confinement

$bc(\epsilon_{bu})$: déformation du béton à l'ELU

$f_{bu} = 0,85 * f_{c28}/g_b$ $g_b=1,5$

f_{bu} : Résistance de calcul en flexion

$f_{bu} = 0,85 * f_{c28}/g_b$ on prend généralement $g_b=1,5$

f_{su} : Résistance de calcul de l'acier ; $f_{su} = f_e/g_b$

f_{cu} : est caractérisé la résistance de calcul du composite

E_c : Le module d'élasticité du matériau en (MPa).

L'allongement relatif du composite ϵ_{cu}

ϵ_{cr} : Allongement relatif à la rupture.

$f_{cu} = E_c . \epsilon_{cu}$ (MPa.) : La résistance de calcul

z le bras de levier

• MRB = moment résistant du béton,

ABREVIATIONS :

PRFC : Polymère Renforcer par la Fibre de Carbone

PRFV : Polymère Renforcer par la Fibre de Verre

PRFA : Polymère Renforcer par la Fibre d'Aramide

PRFC : Epaisseur de la feuille de fibre de carbone

PRFC : Epaisseur de la feuille de fibre de carbone

EPRF : module d'élasticité de la fibre de carbone

PP : Polypropylène

PBT : Polytéraphthalate butylénique

PET : Polytéraphthalate éthylénique

PPO Polyoxide de phénylène

POM : Polyoxyméthylène :

PA : Polyamides

PAI : Polyamide-imide

PEI : Polyéther-imide :

PES : Polyéther-sulfone

PEEK : Polyéther-éther-cétone

T.F.C. : Tissu de Fibre de Carbone

F.R.P. : Fibre à renforcer les polymères

MEF : Méthode des éléments finis.

GFRP : Fibre à renforcer les polymères à base de verre ; glass-fiber-reinforced polymer)

CFRP : Fibre à renforcer les polymères à base de carbone carbon-fiber-reinforced polymer)

ATFC : Fibre à renforcer les polymères à base d'aramide aramid-fiber-reinforced polymer).

HR : Les fibres haute résistance,

IM : Les fibres à module intermédiaire

HM : Les fibres à haut module.

(GD) : les composites grandes diffusions

(HP) : Les composites hautes performances

(TP) : résine thermoplastique.

(TD) : thermodurcissable.



INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

1. INTRODUCTION :

La plus grande partie des ouvrages de génie civil est conçue pour durer 100 ans en moyenne, mais le béton est un matériau relativement fragile [1], il change car la structure dont il fait partie subit elle-même des changements. Ces changements proviennent soit de modifications ou de rénovations, soit d'une altération de sa capacité de support par un accroissement des charges. Dans la plupart des cas, ils nécessitent un renfort. Le renforcement d'une structure en béton consiste à améliorer les caractéristiques mécaniques des éléments qui la composent, de manière à ce qu'elle offre une meilleure solidité aussi bien en état de service qu'en état de résistances ultimes. [91]

Le renforcement des structures de génie civil a pour but de réparer ou mettre en conformité des ouvrages existants, soit pour des raisons de pertes des propriétés initiales, soit pour des raisons de remise à niveau liées à de nouvelles normes ou de nouveaux usages. Initialement des plaques d'acier collées sous les éléments en béton étaient utilisées comme éléments de renforcement, mais elles ont été remplacées progressivement par **les matériaux composites**. L'utilisation de plus en plus fréquente des matériaux composites s'explique d'un part par leurs meilleures propriétés mécaniques et d'autre part, par l'amélioration des procédés de fabrication et de mise en œuvre 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. **Les fibres de carbonnes** sont de plus en plus utilisées comme renfort dans les matériaux de constructions. [18]

Si la première fibre de carbone a été inventée et produite par **T. Edison**, les premières utilisations expérimentales datent des années 1960 et les premières unités industrielles ne sont apparues qu'au début des années 1970 avec l'introduction du **poly acrylonitrile** comme fibre précurseur. [77]

L'intérêt des utilisations de la fibre de carbone dans le génie civil se trouve dans : sa faible densité ; l'absence de corrosion ; sa très bonne tenue à la fatigue ; sa facilité de manipulation et aussi l'insensibilité à la corrosion. [4]

L'utilisation de matériau en polymère renforcé de fibres est une des solutions de plus en plus connue dans l'industrie de la construction. Les fibres sont généralement du carbone, du verre ou de l'aramide noyé dans une matrice de type polymère. L'ensemble possède des propriétés intéressantes. Les matériaux composites sont renommés pour avoir une grande force de résistance et une bonne rigidité tout en ayant un faible poids en comparaison avec les matériaux traditionnels comme l'acier et le béton. [71]

2. PROBLEMATIQUE :

Le renforcement d'éléments en béton armé est enjeu de plus en plus important, aujourd'hui, dans une logique évidente de développement durable, c'est un outil permettant d'assurer une vie plus longue à des ouvrages vieillissant ou changeant d'utilisation, de nombreuses raisons

peuvent justifier des renforcements des édifices : des modifications structurelles, des modifications d'utilisation ou même des réparations après des séismes.

Le renfort de structures en béton armé par des éléments constitués de fibres peut se présenter sous deux aspects différents, l'ajout à la structure d'éléments comme des poutres ou des plaques de **fibres** ou par le collage à la structure en béton de **bandes de renforts**. La technique de collage de matériaux sur des éléments en béton armé se développe depuis plusieurs années. Elle présente l'avantage de s'adapter facilement à de diverses géométries de structures et d'être facilement mise en œuvre même si elle nécessite une attention particulière. Il existe à présent de nombreuses possibilités d'application de cette technique de renforcement de plusieurs types d'éléments de construction, par exemple : les colonnes, les poutres ou les dalles. Cette technique permet d'améliorer :

- la capacité portante
- la rigidité
- la durée de vie des structures
- la durabilité [18]

3. HISTORIQUE :

Une des première méthodes mise au point et qui rencontré un vif succès dans le domaine de la remise à niveau des structures en béton armé, y compris les structures en béton précontraint, est le collage de plaques d'acier à la structure. Le collage des plaques d'acier à des dalles en béton ou à des structures augmente à la fois la résistance et la rigidité et réduit efficacement les fissures. Néanmoins, à long terme la corrosion de la tôle peut poser un problème au niveau de son interface avec le béton armé. Dans ce cas, la détérioration de la tôle peut conduire à l'échec de la réparation et même à la ruine de la structure. Cette technique présente aussi le désavantage d'être difficile à mettre en œuvre en raison de la taille et du poids des tôles. La dernière limite d'elle est le prix matériau lui-même, en effet les prix de l'acier fluctuent énormément.

Une seconde méthode émerge ces dernières années : les techniques de renforcement des structures au moyen de **matériaux composites**. Ce procédé utilise le collage de plats ou de plaques composites (textiles de renforcement unidirectionnels ou bidirectionnels, lamelles, fibres de carbone...) ou la stratification directe in situ de composites (tissus textiles en verre ou carbone) associés à des matrices polymères thermodurcissables (résines époxydes, polyester...). Cette technique de renfort passif est une alternative innovante à la solution traditionnelle utilisant des plats métalliques extérieurs collés. Son utilisation est assez récente, elle remonte à environ à une dizaine d'années dans le Génie Civil.

Elle a commencé à être commercialisée dans les années 1980 aux Etats-Unis, au Japon et en Europe. Le développement de cette technologie aux Etats-Unis et en Europe est dû au besoin de renforcer des structures vieillissantes ou ayant changé de fonctionnalité. Au Japon, elle a surtout été développée pour prévenir les risques de détérioration des structures par des séismes. Le séisme de Hyogoken-Nanbu qui dévasta la ville de Kobe en 1995 a été un élément accélérateur de la recherche dans ce domaine. [18]

Malgré son faible taux d'utilisation. Plusieurs types de structure en béton armé profitent de ce genre de renforcement et ce dans beaucoup de pays tel que le Canada, la Suisse, Allemagne, La Belgique, La France, l'Angleterre, ...etc. [71]

En Algérie, cette technique a montré son efficacité dans le domaine des ouvrages d'art depuis plus de dix ans puisqu'un nombre important d'ouvrages d'art a été renforcé par des matériaux composites comme le pont sur oued Bill Braguettz à Constantine, le pont blanc d'ElHarrach, le pont d'Ighezer Amokrane à Béjaïa, et le pont sur Oued Oumazer à Tipaza. [85]

4. OBJECTIF DE L'ETUDE :

Le domaine de réhabilitation est un domaine très vaste donc il est difficile de s'attaquer à tous les problèmes, d'où il est nécessaire de s'attaquer à une petite partie et c'est celle à laquelle je vais m'y intéresser, elle s'intitule, augmentation de la capacité portante des poutres de pont en béton armé par l'utilisation des matériaux composites cette étude comme toutes autres à un objectif bien défini qui est de garantir les résultats expérimentaux trouvés dans une étude antérieure. Ces travaux de thèse visent à apporter une contribution aux thématiques développées dans ce domaine. Dans cette étude on va essayer de comprendre l'influence du renforcement par TFC sur la poutre et aussi de comparer le comportement de poutres non renforcées par des fibres de carbone et renforcées par des fibres de carbone, en adoptant sur des essais qui sont réalisés en laboratoire pour s'assurer de la faisabilité de la mise en œuvre des fibres de carbone et la viabilité de la solution technique.

5. PRESENTATION DE L'ETUDE :

Notre étude qu'on va faire dans ce travail, tente d'évaluer les gains en capacité générés par la réhabilitation de poutres. De ce fait, nous présenterons les objectifs de notre recherche, La méthodologie, une description de la réhabilitation, une évaluation structurale théorique et pratique avant et après renforcement. On va commencer par une introduction générale, les chapitres I, II, III et IV donnent une synthèse sur la pathologie des ouvrages en béton armé, les différentes techniques de réparation et de renforcement des ouvrages et les différentes propriétés et domaines d'utilisation des matériaux composites. Cette étude comportera aussi d'une partie bibliographique recensant les travaux déjà effectués sur le sujet et les effets attendus de l'utilisation d'un TFC. Une modélisation numérique par la méthode des éléments finis (MEF) basée sur le logiciel ROBOT pour simuler le comportement d'une poutre en béton armé renforcée par matériaux composites à base de fibres de carbone. Le mémoire se termine par une conclusion générale et recommandations mettant l'accent sur l'apport des matériaux composites, en termes de résistance mécanique, dans le domaine des renforcements des éléments de structure en béton armé.

CHAPITRE I :

DESORDRES ET

PATHOLOGIES DES

OUVRAGES EN BETON

ARME

I. DESORDRES ET PATHOLOGIES DES OUVRAGES EN BETON ARME

I.1. INTRODUCTION :

L'étude des pathologies des ouvrages en béton met en évidence l'existence de désordres induits par la dégradation des matériaux. On constate ainsi une altération mécanique et physicochimique des bétons et des armatures métalliques. Les mécanismes de dégradation se traduisent par des fissurations excessives du béton, par des pertes de caractéristiques des armatures corrodées et donc par une diminution des propriétés mécaniques. Afin de pallier les pertes de résistance mécanique des ouvrages, il est devenu nécessaire d'effectuer des réparations[33]. Les ouvrages d'art constituent un patrimoine important des infrastructures et l'évolution de la circulation qui augmente son agressivité nécessite un entretien constant et soigné. [49]

Le vieillissement général des constructions est habituellement associé à une altération (pathologique ou accidentelle) des propriétés initiales du béton, remettant souvent en cause les exigences liées aux propriétés mécaniques, à l'aptitude au service ou encore à l'esthétique de l'ouvrage. Dans un souci de maintenance du patrimoine existant, il est nécessaire de procéder au diagnostic de l'état de santé des structures. Ce diagnostic s'appuie sur des paramètres évalués sur les ouvrages de façon destructive (carottage) et/ou non destructive (ultrasons, radar, inspection visuelle...). Il permet enfin de statuer sur une possibilité de requalification de l'ouvrage ou sur la nécessité de le remplacer. [35]

I.2. ACTIONS ET PATHOLOGIES AGISSANTS SUR LES OUVRAGES D'ARTS :

I.2.1 Action des eaux :

a). **Action de l'eau de mer** : L'attaque par l'eau de mer est fortement conditionnée par la température de l'eau. Activation des réactions chimiques - accélère la cinétique des réactions de dégradation.

- En mer du Nord (10°C) : agressivité beaucoup plus faible
- Dans les mers chaudes (> 25°C) : Dégradations rapides et très sévères. [88]



Fig I.1 : Pont à haubans [87]

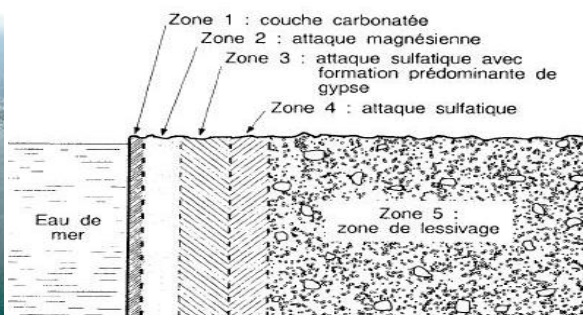


Fig I.2 : Schématisation des zones d'attaque du béton par l'eau de mer [88]

b).Les Affouillements : Se manifestent autour des appuis de pont implanté dans un cours d'eau et surviennent lorsque la vitesse d'écoulement de l'eau qui entoure une fondation est élevée, l'eau écoulée se compose d'un mélange bi-phasique comporte une phase liquide et une phase solide (transport solide). L'action de l'eau est tellement violente qu'elle est capable de dénuder (déchaussé) un massif de fondation et de rendre une construction instable, des ouvrages en entier sont emportés ou détériorés et les remblais d'accès en général sans protection sont affouillés, créant des points de coupure sur des axes névralgiques. [53]

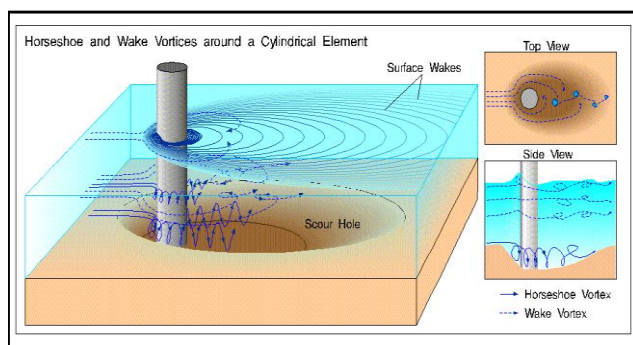


Fig I.3 : Phénomène d'affouillement au pied d'une pile de pont [92]



Fig I.4 : RN 72 PK 10+400 [53]

I.2.2. Attaque du béton par les sulfates et par l'acide sulfurique :

- Formation de **gypse** et d'**ettringite** secondaires
- La présence de **thenardite** (Na_2SO_4) sous l'aspect d'un dépôt blanchâtre mal cristallisé dans le béton est un bon indicateur de la présence de sulfates dans le béton.
- **La thenardite** est un produit de la réaction entre les alcalis (Na^+) de la pâte de ciment et les ions SO_4^{2-} . [88]



Fig I.5 : Dommages causés par la thaumasite [64]



Fig I.6 : L'effritement et l'efflorescence [64]

I.2.3. L'alcali-Réaction :

Est une réaction endogène «génères à l'intérieur » qui affecte le béton dans sa masse contrairement aux autres réactions, l'alcali-réaction peut être considéré comme une réaction solide/liquide entre des formes de silice réactive des granulats et la solution alcaline de la matrice cimentaire distribuée dans la microporosité, pour que la réaction se manifeste, il faut que trois conditions soient simultanément remplies :

- granulats réactifs ou une source d'alcalins (ciments, additions, granulats, adjuvants).
- humidité relative supérieur à 80-85%
- concentration en alcalins excédant un seuil critique

- Une forte concentration d'ions hydroxydes (haute pH).
 - ❖ **Les différents types de réactions :** En général on distingue trois formes de l'alcali-réaction :
 - a) *Réaction Alcali-silice (ASR) (la plus fréquente)*
 - b) *Réaction alcali-silicate*
 - c) *Réaction alcali-carbonate [65]*

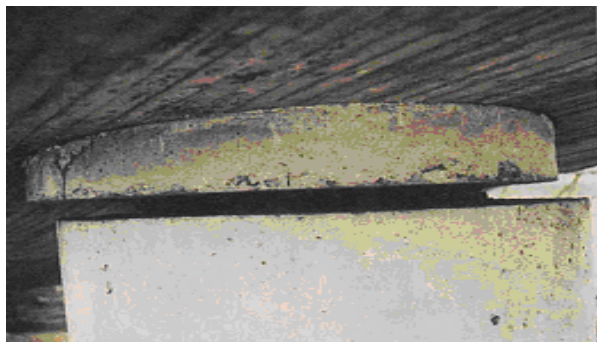


Fig I.7: Déplacement sur appui du au allongement du tablier [63]

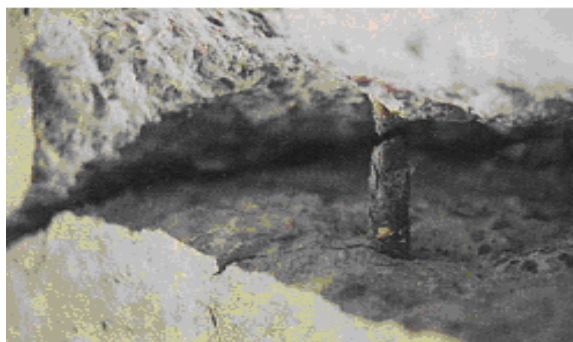


Fig. I.8 :Rupture d'un acier passif [45]

I.2.4.Pénétration des chlorures :

Les chlorures qui viennent du milieu environnant le béton, ont diverses origines : eau de mer et surtout solution de sel fondant utilisé pour le déverglaçage. Leur pénétration commence à la surface du béton. Elle peut momentanément s'arrêter si l'eau qui contient ces chlorures s'évapore totalement. En toute rigueur, la pénétration des chlorures dépend des cycles « humidification par une solution saline - séchage » et de leurs caractéristiques (durée, conditions climatiques). Dans ce cas, la perméabilité du béton influe sur la pénétration des chlorures. Mais, en général, il est admis que cette pénétration est une simple diffusion due à un gradient de concentration (en chlorures) entre la surface polluée en chlorures et le cœur du béton qui n'est pas pollué.

Il résulte de cette pénétration que la teneur en chlorures dans le béton a un certain profil. Il s'agit d'une courbe « concentration-profondeur » qui est strictement décroissante, si les cycles humidification-séchage sont négligeables. Dans le cas contraire, ce profil n'est décroissant qu'à partir d'une profondeur où le béton est saturé d'eau, de façon permanente. [50]

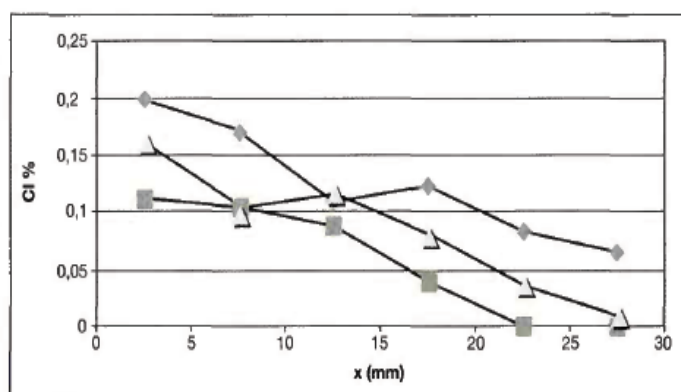


Fig. I.9 : Piqure profonde causée par une attaque de chlorure [54]



Fig. I.10 : Piqure profonde causée par une attaque de chlorure [54]

I.2.5. Progression de la carbonatation :

Le dioxyde de carbone (CO₂) pénètre sous forme gazeuse dans le béton. En présence d'eau interne (qui existe au moins dans les pores les plus petits), il provoque une réaction, dite de carbonatation. Cette réaction transforme les hydroxydes [surtout la chaux Ca (OH)₂] en carbonates et abaisse le pH de la solution interstitielle depuis environ 13 jusqu'à environ 9. Ceci risque de provoquer la corrosion des armatures, lorsque le front de carbonatation atteint les armatures. [50]

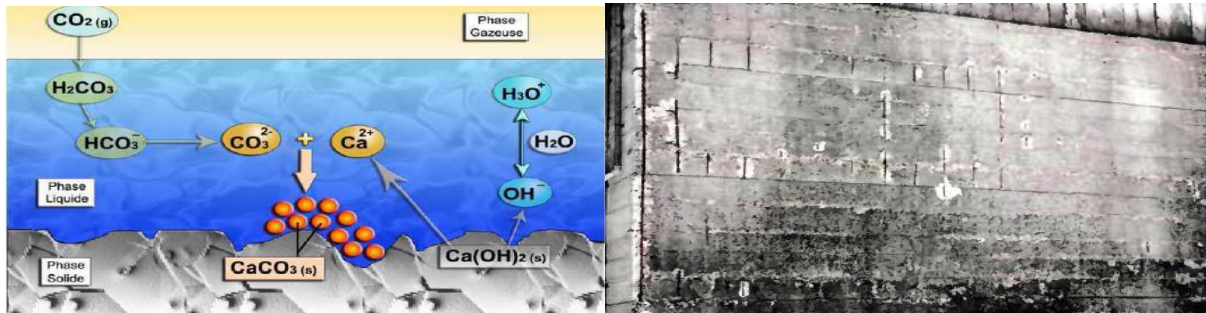


Fig. I.11 : Mécanisme de carbonatation de Ca(OH)₂ [29] Fig. I.12 : Exemple d'armatures apparentes corrodées[50]

I.2.6. Corrosion des armatures métalliques : Les corps dissous dans le milieu qui environne l'ouvrage, peuvent pénétrer progressivement dans le béton. Certains d'entre eux sont agressifs, par exemple le dioxyde de carbone (CO₂), les acides (engrais, etc.) et les chlorures. Un acier mis au contact d'un béton qui a une forte basicité (pH de l'ordre de 12) et qui n'est pas pollué par des chlorures, se recouvre d'oxydes protecteurs. Si son enrobage est chimiquement modifié, cet acier se recouvre de produits "intermédiaires" qui ne sont pas stables en présence d'oxygène dissous dans le béton. Ils se transforment en des produits "finaux" non protecteurs, ce qui conduit à la dissolution et à l'enrouillèrent continus de l'acier. [33]

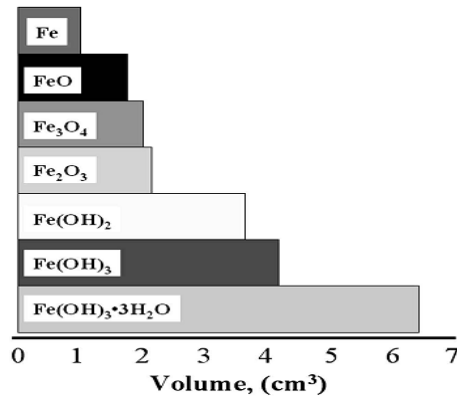


Fig. I.13 : Volume relatif des produits d'oxydation du fer [27].

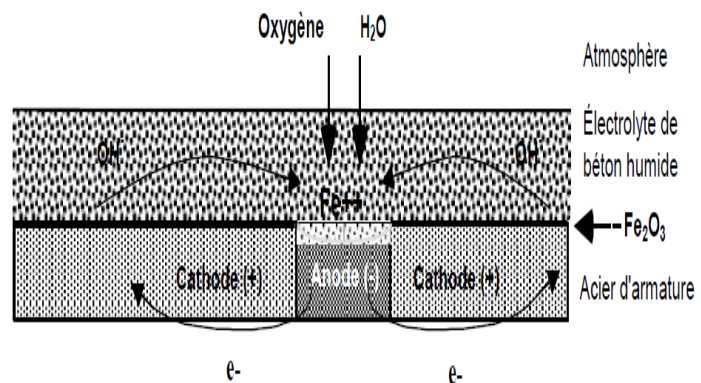


Fig. I.14 : Représentation schématique du mécanisme de la corrosion des aciers d'armature dans le béton. [90]

Etapes de la corrosion : La figure 1 met en évidence les différentes étapes de la corrosion des armatures avec les deux phases

- la phase d'incubation : phase où les agents agressifs pénètrent jusqu'aux armatures
- la phase de propagation de la corrosion [13]

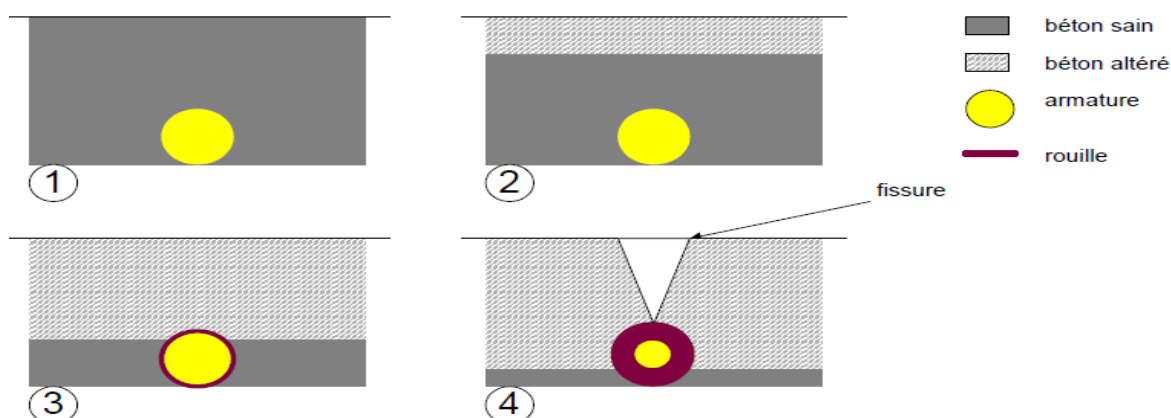


Fig. I.15 : Les phases de corrosion [36]

I.2.7. Le Choc : Il s'agit le plus souvent d'une attaque mécanique concrétisée par des chocs, dont les plus fréquents sont ceux des poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts, chocs de bateaux ou d'objets flottant contre les piles en rivière ainsi que les chocs de véhicules contre les barrières de retenu constituent une autre source de chocs non négligeable.

Un dommage dû aux ondes de choc est caractéristique, les éléments du béton sont épauprés et laissent généralement à nu le cadre d'armatures, les cassures sont fraîches et non altérées, les armatures ne sont pas corrodées, en plus, les épauprés résultant sont profonds et ils n'ont pas l'aspect d'un écaillage, de plus, l'ouvrage est généralement soumis à des impacts (quais ou pont) ce qui fait qu'un tel dommage est immédiatement suspect.[53]



Fig. I.16 : Les différentes dégradations causées par le choc [53]

I.2.8.Action Sismique :

Nombreuses sont les régions du monde qui connaissent une activité sismique régulière, atteignant parfois une rare violence. Les conséquences d'un séisme peuvent devenir dramatiques dès que l'accélération au sol dépasse $0,3 g$. De façon schématique, un séisme est un déplacement imposé induisant, dans les diverses parties d'un pont, des efforts dont l'intensité est d'autant plus élevée que les parties en question sont plus lourdes et rigides. On a souvent noté le bon comportement des ponts-dalles en béton armé ou précontraint à plusieurs travées lorsqu'ils n'étaient pas trop biais, et même des poutres précontraintes par post-tension, lorsqu'elles étaient contreventées et reposaient sur des appuis en néoprène. Par contre, les effondrements les plus spectaculaires ont été observés dans le cas de structures peu hyperstatiques comportant des éléments de ductilité insuffisante, liée le plus souvent à une insuffisance d'armatures transversales et/ou à un excès d'armatures longitudinales mal maintenues dans les zones sollicitées au-delà du domaine élastique. [23]

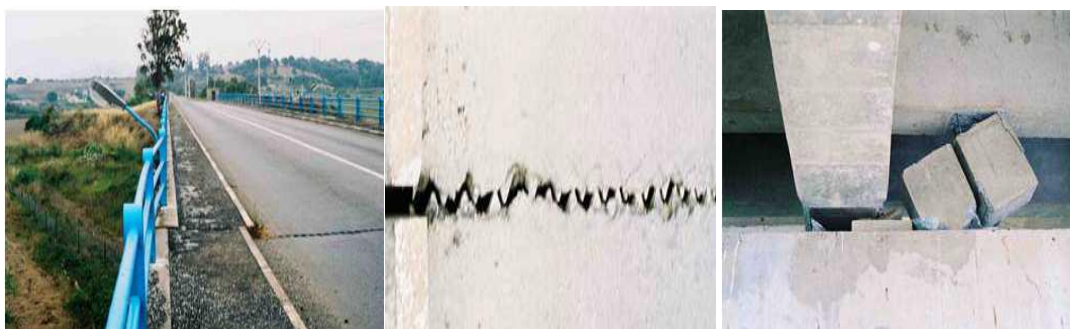


Fig. I.17 : Exemples des dommages induits par le séisme [73]

I.2.9. La Fatigue : Les trafics routier et ferroviaire engendrent des variations de contraintes cycliques d'intensité et de fréquence élevées : il est donc logique que les ponts soient potentiellement susceptibles de s'endommager en fatigue.

Les ponts en béton peuvent subir un endommagement par fatigue : il se traduit par une dégradation de l'adhérence entre le béton et les armatures entraînant l'apparition d'une fissuration pouvant affecter la durée de vie de l'ouvrage, voire des déformations irréversibles sous l'effet des charges de service. Le degré d'endommagement dépend de nombreux facteurs comme le nombre et l'intensité des cycles de chargement, la variabilité des charges appliquées et le degré de fissuration entraînant une modification des propriétés du béton.

Le phénomène de fatigue concerne principalement les armatures dans les structures en état de précontrainte partielle « involontaire », pour lesquelles il n'a donc pas été pris en considération. Il n'a jamais été observé dans le béton de tabliers non fissurés. [22]

I.2.10. Le Retrait du Béton :

Lorsque on observe une pièce de béton aussitôt son gâchage, on constate qu'en, l'absence de toute force extérieure, elle change de volume. Cette propriété, qui a pris le nom de retrait, est à l'origine de désagréments de toutes sortes que les constructeurs connaissent bien. Il est, en réalité, la résultante de mouvement complexe. [53]

I.2.11. Les dégradations liées au gel du béton :

En période hivernale, les cycles de gel-dégel peuvent être à l'origine de deux types de dégradations du béton, dans la masse d'une part (gel interne) et en surface d'autre part (écaillage). Divers phénomènes conduisent au gel interne du béton. Un déséquilibre thermodynamique est engendré par la propagation d'un front de gel ou de dégel dans le béton. La solution interstitielle du béton se transforme en glace dont le volume massique est plus élevé que celui de l'eau. Les pressions hydrauliques engendrées par les mouvements de la solution liquide non encore gelée provoquent la fissuration du béton, son gonflement puis son éclatement. Les dégradations dites de gel interne ne se produisent pas lorsqu'il existe dans le béton un réseau de petites bulles d'air dense et homogène permettant le déplacement de l'eau sans dommage pour le béton. [50]

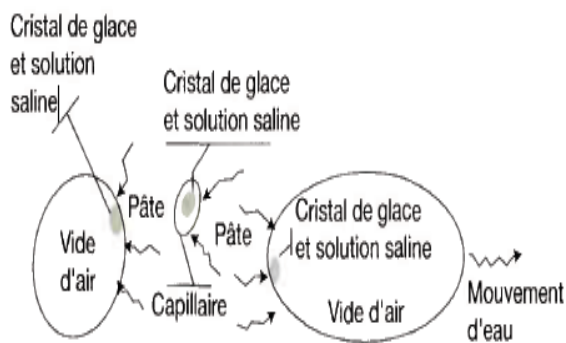


Fig I.18 : Fragment de pâte de ciment contenant un capillaire et **deux** bulles d'air. [50] Fig I.19 : Dégradation du béton sous l'effet du gel-dégel [50]

I.2.12. Défauts d'exécution :

Un certain nombre de dégradations du béton sont provoquées par une mauvaise exécution qui peut commencer dès la fabrication du béton et se poursuivre jusqu'à la mise en place de l'étanchéité. Nous allons passer en revue les principaux défauts d'exécution rencontrés et les types des dégradations du béton qui en résultent :

- Une mauvaise formulation du béton qui engendre une porosité trop élevée
- Mauvaise exécution des coffrages
- Mauvaise disposition des armatures
- Mauvaises conditions de transport du béton frais
- Mauvaise mise en œuvre du béton
- Mauvaise manutention d'éléments lourds en béton [62]

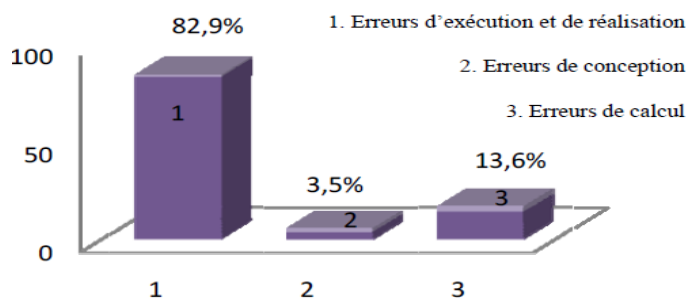


Fig I.20 : Facteurs d'influences sur la dégradation des ouvrages en BA [48]

I.3. LES DEGRADATIONS :

I.3.1. La fissuration :

La fissuration des ouvrages, qu'elle présente ou non un caractère pathologique sur le plan structurel, peut entraîner une diminution de la durabilité des ouvrages dès lors que les fissures sont suffisamment ouvertes et profondes pour permettre une pénétration des agents agressifs jusqu'aux armatures. Indépendamment des phénomènes précédemment évoqués, elle peut résulter de retraites du béton d'origine thermique ou hydrique, et/ou de mouvements de l'ouvrage d'origine mécanique ou thermique. La fissuration peut aussi entraîner ou accentuer les différents types de dégradations examinés ci-avant. On peut y pallier en mettant en œuvre par exemple des revêtements souples s'accommodant des variations d'ouverture des fissures tout en répondant aux autres critères de protection nécessaires. [50]



Fig I.21 : Poutre de tablier [36]

I.3.2. Autres Désordres :

a) *Efflorescence* : Le terme «*Efflorescence*» désigne le dépôt de sels blancs de carbonate de calcium observés sur la surface du béton ou de mortier. Il en résulte des hétérogénéités de teinte d'autant plus visible que la surface de béton est sombre. Les efflorescences ne modifient en rien la résistance mécanique et la porosité du béton. Elles affectent uniquement son aspect. [10]



Fig I.22 : Efflorescence de dalle du pont [81]



Fig I.23 : Efflorescence au niveau de chevêtre [81]

b) Les épaufrures :

Elles correspondent à un éclatement du béton avec chute de fragments, laissant souvent les armatures apparentes. Les épaufrures sont généralement la suite logique d'un écaillage ou elles ont provoqué par des ondes de choc. [53]



Fig I.24 : Epaufrure due par pression de corrosion [53]



Fig I.25 : Epaufrure cause par le choc [53]

c) L'écaillage :

L'écaillage est un phénomène de désagrégation des surfaces de béton provoqué par leur exposition au gel/dégel en présence d'humidité ou de sels déglacant. Généralement, son apparition commence par de petites zones localisées, qui par la suite peuvent se rejoindre, s'étendre et affecter de grandes surfaces. Lors d'un écaillage léger, les gros granulats restent enrobés dans la pâte. [53]

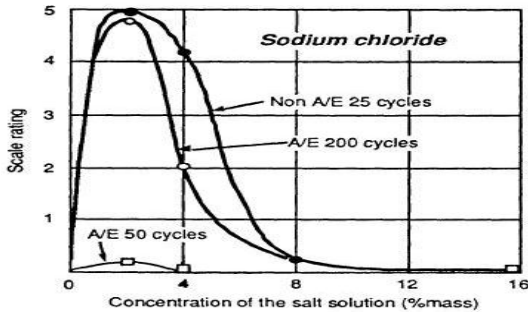


Fig. I.26 : Effet de la concentration en NaCl sur l'écaillage de surface [89]

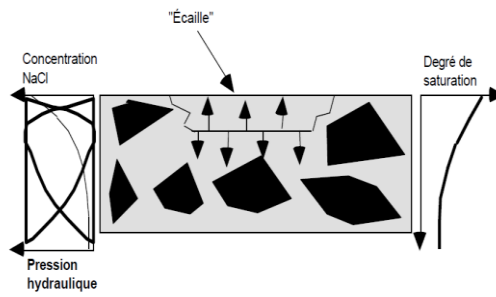


Fig. I.27 : Mécanisme de formation des 'écailles' [89]

d) Délamination :

L'action conjuguée des sollicitations climatique, des sels anti-verglas et du trafic circulant directement sur le béton constitutif des hourdi de pont à provoquer des « Délamination » du béton sur un nombre considérable d'ouvrages d'art. Dans les cas les plus graves, cette pathologie aboutit à la chute de plaques de béton et à la création de trous dans les tabliers de pont. Le délaminage est la séparation des couches de béton ou à proximité de la couche extérieure de l'acier d'armature. Le délaminage est causé par l'expansion de la corrosion d'armature en acier et peut conduire à la fissuration sévère. La rouille peut occuper jusqu'à dix fois le volume de l'acier corrodé qu'il remplace. [53]

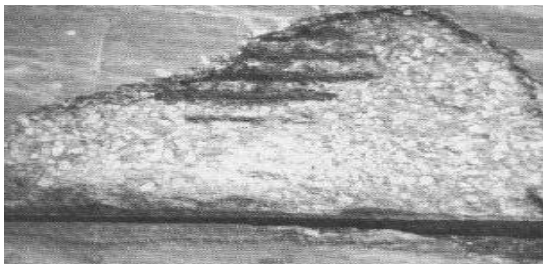


Fig I.28 : Délamination à la base d'une poutre [90] Fig I.29 : Délamination dues à la corrosion dans un caisson en béton armé. [90]

e) Défauts de construction :

Cela inclut les questions de consolidation telle que les poches de roche, les vides en nid d'abeille, des trous de bugs, et des stries de sable qui peuvent résulter de vibrations incorrecte, mélange sec, sans super Plastifiant, mélanger trop mouillées, l'espacement des barres d'armature incorrecte ou mauvaise sélection des agrégats.[53]



Fig. I.30 : Défaut de mal exécution des travaux [7]

f) Eclatement localisé :

Sont le résultat de réactions alcali-silice se déroule dans le béton comme des fragments conique apparaissant à la surface du béton en laissant de petits trous, des pertes des particules seront généralement trouvés au fond du trou. [53]



Fig. I.31 : Eclatement localisé [53]

g) La ségrégation :

Variation dans la répartition des éléments du béton, se traduisant par des concentrations différentes des composants du béton. Une ségrégation dans la masse de l'ouvrage conduit à un affaiblissement de sa résistance et une diminution de son étanchéité [53]



Fig. I.32 : Ségrégations [53]

1.4.CONCLUSION :

On a vu dans ce Chapitre que tous les mécanismes de dégradation des matériaux et perte de performance ou de comportement sont dues par plusieurs facteurs qu'on ne peut pas les maîtriser tous, donc ***la notion de la structure parfaitement durable c'est une notion irréalisable***, cette vulnérabilité des structures nous exige à faire recours à des réparations ou des renforcements à travers le cycle de la vie de l'ouvrage.

A cet effet il nous faut plus de la compréhension des mécanismes dégradant, la maîtrise des méthodes des détections des causes et pathologie ainsi que celles des séparations entre ces pathologies pour l'élaboration d'un diagnostic le plus juste possible.

CHAPITRE II :

TECHNIQUES DE

RENFORCEMENT DES

OUVRAGES EN BETON

ARME

II. TECHNIQUES DE RENFORCEMENT DES OUVRAGES EN BETON ARME

II.1. INTRODUCTION :

La maintenance des ouvrages de génie civil est un problème de plus en plus préoccupant dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est de plus en plus élevé. Le but est de réparer en assurant la performance, aussi bien du point de vue de l'économie que de la durabilité de ces ouvrages. [67]

La durée de vie est devenue à la fois une exigence et un souci : il convient de l'assurer par une conception et une mise en œuvre adéquates, de la quantifier (d'où le recours à l'évaluation non destructive), de la restaurer ou de la prolonger. Les maîtres d'ouvrages ont donc le souci de connaître l'état du patrimoine existant afin de s'assurer de sa stabilité dans le temps. Faut-il laisser l'ouvrage en l'état, le réparer ou le détruire ? Dans le cas de réparation se pose la question de la pérennité de cette réparation.

La durée de vie d'un ouvrage de génie civil résulte de l'interaction de nombreux facteurs, parmi lesquels :

- la durabilité des matériaux (ou qualité des matériaux)
- la durabilité de leur assemblage (association de plusieurs matériaux)
- le cumul des dégradations et d'actes pathologiques
- l'évolution de l'environnement d'exploitation
- l'évolution du contexte socio-économique et réglementaire (qui peut conduire à vouloir prolonger la période d'exploitation d'un ouvrage ancien)
- la revue des fonctions assignées à l'ouvrage... [13]

II.2. RAISONS D'UN RENFORCEMENT :

Problèmes de durabilité dus à l'utilisation de matériaux de construction non performants ou non adaptés

- Projets ou mises en œuvre inadéquats
- Environnement agressif non prévu lors de la conception
- Augmentation des exigences de charges due à des modifications dans l'usage de la structure
- Augmentation de la durabilité d'anciennes structures [76]

II.3. DIFFÉRENTES SOLUTIONS TECHNIQUES DE RÉPARATION ET DE RENFORCEMENT DES OUVRAGES EN BETON :

II.3.1. Réparation des désordres superficiels :

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

- ✓ une préparation de surface avec élimination du béton dégradé et de toute trace de pollution

- ✓ le traitement éventuel des armatures contre les risques de corrosion
- ✓ la reconstitution de l'enrobage des armatures et de la géométrie de la pièce par un ragréage manuel ou mécanisé avec du béton ou un mortier technique de réparation adapté ou par projection de béton ;
- ✓ la mise en œuvre d'un revêtement de protection ou à caractère esthétique sur les surfaces traitées.

Les produits utilisés pour la réparation des bétons dégradés sont classés en 3 catégories :

- produits et systèmes à base de liants hydrauliques classiques ou modifiés par ajout de polymères
- produits et systèmes à base de résines synthétiques
- produits et systèmes mixtes dont le liant actif est constitué à la fois de liant hydraulique et de résines synthétiques. Ils doivent être compatibles avec le béton de la structure et adaptés aux conditions d'environnement. [51]

II.3.2. Traitement des fissures :

Il existe 5 principales techniques de traitement des fissures. Le choix de la technique adaptée est fonction des caractéristiques de la fissuration :

Ouverture (microfissures, fissures fines, fissures moyennes...), profondeur, activité (fissures ouvertes, fermées, mortes, actives...), tracé, géométrie, exposition aux intempéries (fissures sèches, humides, saturées, ruisselantes...), présence d'eau libre ou sous pression... de l'état et du type de support et du délai imposé pour la remise en service de l'ouvrage. [51]

✚ Injection des fissures :

Selon l'origine des contraintes de traction qui les ont provoquées, les fissures offrent un faciès et un tracé typiques. Très souvent, notamment dans le cas de la flexion, la fissuration comporte des fissures principales nettes et rectilignes sur lesquelles se greffent de nombreuses ramifications.

L'injection des fissures précède généralement un autre système de réparation. Il peut s'agir de simplement les colmater pour empêcher la pénétration de tout corps étranger et, en particulier, de l'eau, ou d'introduire un matériau en complément d'un ajout de forces par précontrainte pour rétablir le monolithisme de la structure. [23]

✚ CACHETAGE :

Il a pour but d'obturer provisoirement une fissure pendant l'injection afin de contenir le liquide injecté dans la fissure jusqu'à sa prise. [51]

✚ CALFEUTREMENT :

Qui consiste à obturer la fissure par application d'un produit déposé dans une engravure façonnée le long de son tracé avec une ouverture de l'ordre des deux tiers de sa profondeur [23]

✚ PONTAGE :

Qui rend hermétique l'ouverture de la fissure par application superficielle d'un film généralement armé et adhérent (épaisseur 3 mm) de part et d'autre des lèvres de la fracture.

Le pontage s'insère le plus souvent dans un complexe de revêtement général. [23]

✚ PROTECTION GÉNÉRALISÉE :

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

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

Brossage, décapage thermique, aspiration, lavage à l'eau sous pression, à l'air comprimé... afin d'éliminer toute trace de laitance, de poussières, de mousses qui pourrait perturber l'efficacité de l'injection. Différentes normes précisent les caractéristiques (mécaniques, comportement à la température, aux agents agressifs...) que doivent respecter les produits en fonction de chaque technique d'injection. [51]

II.3.3.Méthode traditionnelle d'augmentation des sections avec ou sans armatures :

Il s'agit d'augmenter la section d'origine en béton à l'aide d'un coffrage de manière à envelopper l'élément existant. Le béton sera coulé dans ce coffrage.

Il faut utiliser un micro béton auto nivelant et auto compactable pour remplir les interstices sans l'usage d'aiguilles vibrantes.

La préparation du support est très importante, il est donc nécessaire de faire des décaissés dans le béton pour améliorer la transmission des efforts, de traiter les surfaces avec une peinture primaire de résine époxy. Ces décaissés seront remplis en béton avant le séchage des résines. S'il s'agit d'un renforcement avec armatures, il faudra mettre cette armature en place et réaliser le bétonnage par coulage ou pompage. Le béton devra être traité avec des adjuvants pour éviter la vibration et le compactage.

Les endroits les plus communs pour ce type de renfort sont les piliers soumis à compression (en plaçant des couronnes autour de l'élément à renforcer), les éléments (poutres ou dalles) soumis à des moments fléchissant et à des efforts de cisaillement et la partie comprimée des dalles ou plaques. [91]

II.3.4.Renforcement des structures par précontrainte additionnelle :

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés graissés généralement disposés à l'extérieur du béton. La précontrainte additionnelle va introduire dans la structure des sollicitations complémentaires, qui vont compenser les défauts de dimensionnement ou de conception ou des efforts supplémentaires, que doit supporter la structure suite à des modifications des conditions de chargement ou d'utilisation. Les nouveaux câbles ou torons doivent, en apportant de la compression, recomprimer les zones tendues, sans ajouter d'excès de contraintes dans les zones comprimées. Cette technique permet :

- soit d'améliorer la pérennité des ouvrages
- soit de renforcer des ouvrages en béton (en particulier des ouvrages en béton précontraint dont les câbles présentent des problèmes de corrosion ou de ruptures de torons ou d'ancrages ou qui ont fait l'objet lors de leur dimensionnement de prise en compte de lois de fluage mal adaptées)
- Soit d'augmenter la capacité structurale des ouvrages (augmentation des charges ou des trafics, modification des fonctionnalités, passage de tramways ou de convois exceptionnels). [51]

II.3.5. Protection des bétons par application de produits à la surface du parement :

La protection des bétons vis-à-vis des agressions ou des attaques extérieures par application de produits à la surface du parement permet :

- soit de prolonger la durée d'utilisation d'ouvrages anciens pour lesquels les désordres par corrosion sont apparents mais qui ne présentent pas de dégradation structurelle
- soit de protéger de manière préventive des parties d'ouvrages neufs particulièrement exposées aux agents agressifs ou aux intempéries. La protection permet de ralentir le

vieillesse du béton ou d'arrêter l'évolution de la dégradation, empêchant la pénétration des agents agressifs sous forme liquide ou gazeuse. [51]

II.3.6. Méthode d'adjonction des platines en acier :

Il s'agit du type de renfort le plus utilisé pour les dalles, les poutres en béton et les piliers en compression. L'union de la platine à la structure peut se faire par collage, vissage, rivetage ou ancrage. Du point de vue de la transmission des efforts, la meilleure technique est celle du collage.

Il existe des résines acryliques, furaniques, polyester, etc., mais la plus performante est la résine époxy. Pour ce type de renfort, la surface du béton doit être lisse, régulière, sèche, soignée et débarrassée de poussières, peintures, huiles, etc. La qualité de l'acier des platines doit être inférieure à la qualité de l'acier des armatures. L'épaisseur doit être d'environ 3 mm. La platine doit être propre, non rouillée et traitée contre la corrosion. L'exécution se réalise par application de la colle, placement des platines et pression uniforme de 40 N/m². Les platines peuvent aussi être appliquées pour la reprise d'efforts tranchants, sur les côtés des poutres, afin de couvrir les fissures d'effort tranchant qui présentent une inclinaison de 45°. On considère le renfort de piliers avec profils en angle comme un renfort par platines en acier. Il s'agit d'un cas de compression. [91]

II.3.7. Béton projeté :

Il existe deux techniques principales de projection du béton, dont la différence principale réside dans la chronologie des opérations élémentaires [24]

a). Procédé par voie humide :

Le procédé par voie humide implique qu'un béton ou un mortier soit pompé de façon conventionnelle dans un boyau et projeté à haute vitesse contre une surface réceptrice en utilisant de l'air comprimé ajouté à la lance. [24]

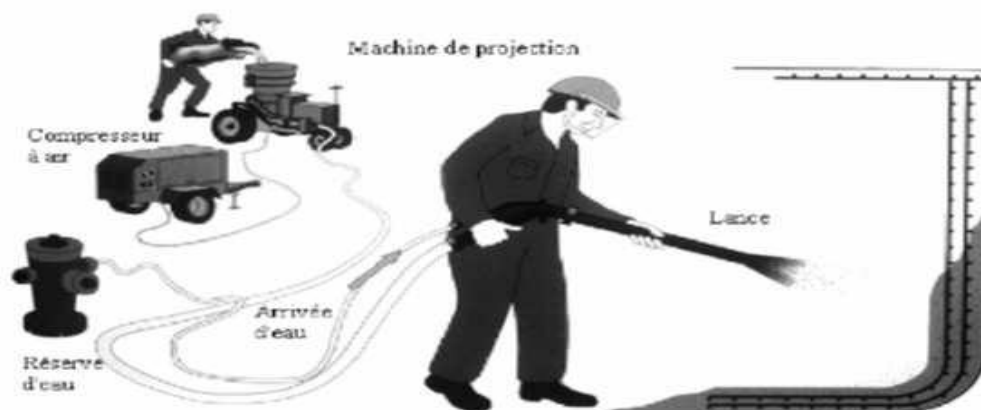


Fig. II.1. Projection Par Voie Humide. [53]

b). Procédé par voie sèche : Avec cette technique, le mélange des constituants (à l'exception de l'eau) est introduit dans la machine à projeter, puis propulsé dans une canalisation par un flux d'air comprimé. Dans la projection sans pré mouillage, l'eau est introduite au droit de la lance de projection, tandis qu'avec pré mouillage l'eau est ajoutée dans la conduite deux à trois mètres avant la lance. [24]

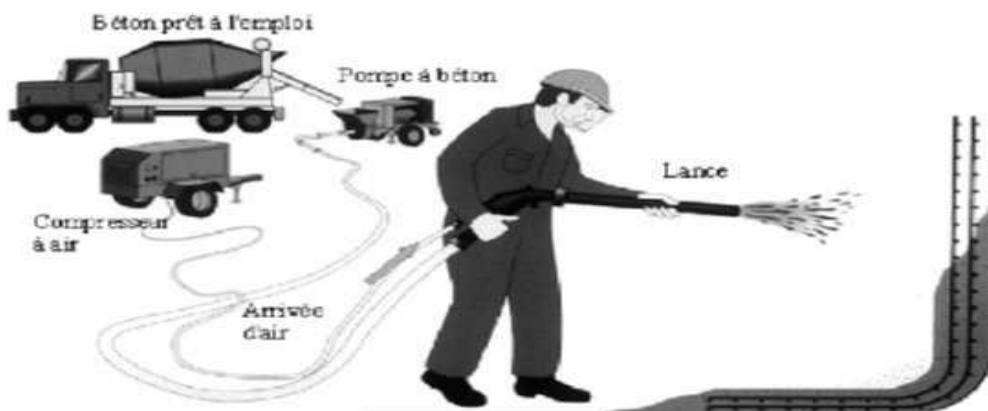


Fig. II.2. Projection Par Voie Sèche. [53]

II.3.8. Réparation des ouvrages en béton armé dégradés par corrosion des armatures :

Le béton est généralement associé à des armatures (en acier au carbone), ce qui permet d'augmenter sa résistance en traction et en flexion, d'où le terme de béton armé. Dans un béton sain offrant un environnement basique les armatures sont naturellement passivées. Les armatures proches de la surface protégées par le béton d'enrobage peuvent être soumises, au cours de la vie de l'ouvrage, à un phénomène de corrosion. De nombreuses solutions de réparation du béton armé dégradé par corrosion des armatures sont disponibles. Elles permettent de réparer durablement le parement en béton et évitent de nouveaux désordres. Il existe 3 familles de techniques :

- **la réparation traditionnelle** : remplacement du béton carbonaté ou pollué par les chlorures et des armatures corrodées
- **les traitements électrochimiques** : protection cathodique, protection galvanique, ré alcalinisation, déchlorurassions
- **la mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion** depuis la surface du béton. [51]

II.3.8.1. Réparation traditionnelle :

Cette réparation est la plus classique. Elle consiste à :

- enlever dans la zone dégradée, le béton d'enrobage non adhérent et dégager les armatures corrodées à traiter, par un moyen mécanique ou chimique. Le dégarnissage doit être effectué jusqu'à ce que l'acier sain soit mis à nu sur une longueur d'au moins 50 mm. Les armatures doivent être dégagées sur la totalité de leur circonférence. De nombreuses techniques permettent l'enlèvement du béton dégradé : burinage, repiquage, bouchardage, décapage à l'eau à haute pression, sablage à sec ou humide, ponçage, décapage thermique, décapage chimique. L'importance de cette préparation est fonction de la profondeur de carbonatation du béton ou des profils de concentration des chlorures.
- éliminer l'intégralité des parties corrodées sur toute la surface des armatures par brossage métallique, repiquage, sablage ou grenailage et toutes poussières résiduelles ou souillures, soit par lavage à l'eau, soit par brossage, aspiration ou soufflage à l'air.
- remplacer les armatures corrodées ou mettre en place des armatures complémentaires par recouvrement, scellement ou soudure pour restituer la section d'armature initiale en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement nécessaires afin de redonner à l'ouvrage sa capacité structurelle. Les armatures peuvent recevoir une protection contre la corrosion par application sur toute leur surface d'un revêtement adapté (inhibiteur anodique, résine synthétique ...). [51]

II.3.8.2. Traitements électrochimiques :**+ PROTECTION CATHODIQUE :**

La corrosion des armatures résulte du passage d'un courant dans des piles locales où le métal joue le rôle d'anode. La protection cathodique consiste à porter l'acier à un potentiel pour lequel la réaction anodique devient pratiquement négligeable. Cette technique est surtout utilisée pour contrôler la corrosion plus que pour la prévenir. Ce type de protection consiste à faire passer un courant imposé par une source extérieure entre les armatures (cathode) et des anodes constituées par des matériaux inertes. La source de courant est ajustée pour maintenir l'acier dans des conditions de protection (en général, de l'ordre de 10 mA / m² d'armature). Les aciers d'armatures deviennent donc des cathodes. Des anodes externes sont généralement appliquées à la surface du béton. Un **courant continu** est appliqué aux anodes à l'aide d'un redresseur relié à une alimentation électrique (Fig. II.4). Le **circuit électrique** est complété en reliant les **barres d'armatures à la borne négative** du redresseur. La protection des aciers d'armature peut être obtenue avec des potentiels relativement faibles. [90]

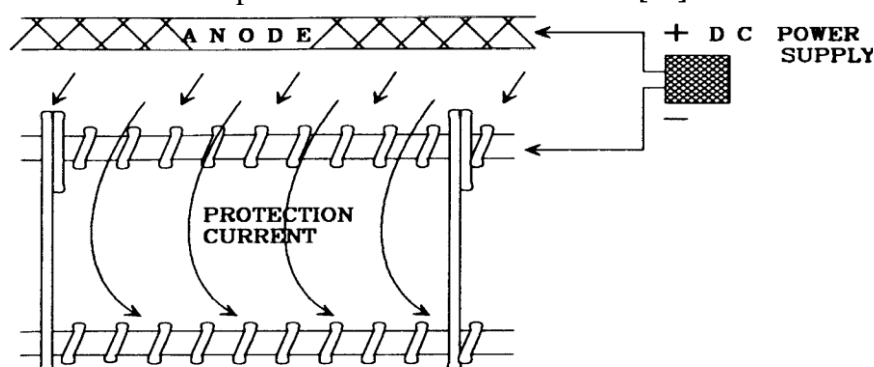


Fig. II.3. Représentation schématique d'un système de protection [90]

+ PROTECTION GALVANIQUE :

Une anode active dite sacrificielle est placée sur le parement de la surface à traiter (film de zinc...) ou dans l'enrobage (pastille de zinc). Elle est connectée aux armatures. Il se crée ainsi un courant galvanique sans alimentation électrique. L'électrolyte (eau contenue dans la capillarité du béton et dans les hydrates des pâtes de ciment) assure la bonne conductivité électrique entre l'anode et la cathode. [51]

+ RÉALCALINISATION DU BETON :

Le principe et la mise en œuvre de la ré-alcalinisation du béton sont très proches de ceux relatifs à la méthode d'extraction des chlorures. Les deux différences principales résident dans le remplacement de la pâte à papier humide par une pâte à papier imprégnée d'une solution alcaline généralement à base de carbonate de sodium, et dans l'application d'une densité de courant plus faible (0,1 A/m²).

Bien que le mécanisme de cette méthode électrochimique de ré-alcalinisation ne soit pas complètement élucidé, on distingue deux phénomènes principaux qui sont une électrolyse à proximité de la cathode permettant, par la création d'ions OH⁻, de renforcer la passivation des aciers, et une pénétration des ions Na⁺ en provenance de la solution alcaline. Mais il faut s'assurer préalablement que le béton ne va pas développer d'alcali-réaction sous l'effet de cette ré-alcalinisation. [23]

+ EXTRACTION DES CHLORURES :

Selon un procédé breveté, un treillis est fixé sur la paroi de béton à traiter, puis enrobé par une couche de pâte à papier humide projetée. Une tension électrique continue est appliquée entre ce

treillis (anode) et la nappe d'armatures de l'ouvrage (cathode). Ce treillis est constitué d'acier, dans le cas d'une anode sacrificielle, et de titane, dans le cas d'une anode inerte. Les ions négatifs et, en particulier, les ions chlorures Cl^- , placés dans ce champ électrique migrent vers l'anode. Cette opération provoque aussi, à la cathode, une réaction électrochimique avec création d'ions hydroxyles OH^- qui tendent à renforcer le pH autour de l'armature (repassivation), mais qui migrent aussi, en partie, en direction de l'anode. [23]

II.3.8.3. INHIBITEURS DE CORROSION :

Il s'agit de produits appliqués en surface du béton et destinés à migrer jusqu'aux armatures pour les protéger. Actuellement, il s'agit essentiellement dans le domaine minéral de produits à base de phosphates et dans le domaine organique de produits à base d'aminés.

Leur épaisseur à la surface du béton peut être considérée comme nulle, alors que leur migration à l'intérieur du béton peut atteindre plusieurs centimètres. [50]

II.3.9. Renforcement par collage de tissus composites :

Afin de s'affranchir des difficultés liées à la mise en œuvre des tôles collées, plusieurs groupes d'industriels et de laboratoires ont entrepris des recherches portant sur l'emploi de matériaux composites. La voie la plus prometteuse semble être le renforcement des structures en béton, en acier ou en bois par imprégnation et collage d'un tissu sec à base de fibres de carbone. [23]

II.3.9.1. Procédure de mise en œuvre du TFC :

Dans le cas du béton, il convient d'effectuer un sablage à sec en vue d'obtenir un état de surface rugueux et uniforme en tous points avec des reliefs d'impact compris entre 0,5 et 1 mm ; les dépôts de poussières et les particules non adhérentes sont éliminés par un brossage énergétique. Dans le cas de l'acier, de la même façon, il convient d'éliminer les parties oxydées non adhérentes et de dégraisser la surface. Dans le cas du bois, il est nécessaire de mettre à nu le matériau sain en éliminant par exemple les couches de peinture ou les parties contaminées après un incendie.

Une couche de résine est d'abord appliquée au rouleau à poils ras de façon à atteindre un dépôt de 650 à 700 g/m². Le TFC, protégé par une feuille de polyéthylène, est ensuite appliqué. Si nécessaire, il est possible de juxtaposer plusieurs bandes bord à bord. Puis, une couche d'imprégnation de la même résine est mise en place à la spatule à raison de 700 g/m² environ. Si nécessaire, cette opération peut être renouvelée pour une deuxième couche de TFC. Enfin, une couche de fermeture, appliquée à la spatule, est constituée de la même résine additionnée d'une pâte colorante assortie au support. [23]

II.3.9.2. Exemple des matériaux composites utilisant dans le renforcement :

a). Lamelles :

Lamelles renforcées en fibres de carbone, fabriquées par un procédé de pultrusion avec des propriétés de matériaux spécifiques. Utilisées principalement pour le renforcement **en flexion** ou pour des structures chargées de manière dynamique ou statique comme des ponts, dalles de plafond ou parois verticales. [76]



Fig. II.4 : Lamelles [76]

b).Fibres de carbone en lamelles :

Agrandissement 1/2000

Contenu de fibres en volume > 68% [76]



Fig. II.5 : Fibres de carbone en lamelles [76]

c).Sika® CarboShear® L :

Éléments en fibres de carbone en forme de « L » utilisés pour des applications extérieures pour le renforcement à l'effort tranchant de poutres en « T » ou comme outils d'ancrage des lamelles. [76]



Fig II.6 : Sika® Carbo Shear® L[76]

d).Tissus : Tissus unidirectionnels à base de carbone, fibres de verre ou fibres aramides. Principalement utilisés pour les renforcements sismiques ou les renforcements à l'effort tranchant. [76]



Fig. II.7 : Tissus unidirectionnels [76]

II.4.COMPARAISON ENTRE LE RENFORT AVEC DES LAMELLES COMPOSITES ET LE RENFORT AVEC DES PLATINES EN ACIER :

Le renfort avec des lamelles comporte de nombreux avantages. En effet, les lamelles sont cinq fois plus légères que l'acier, dix fois plus résistantes (donc plus optimisées), d'une faible épaisseur et d'une grande flexibilité (donc plus faciles à transporter). D'autre part, les unions par soudure n'étant pas nécessaires, leur longueur n'est pas limitée. Grâce à ces caractéristiques, elles s'adaptent plus facilement aux supports ; les croisements de lamelles peuvent se faire sans travaux complémentaires ; on constate moins d'interférence avec le reste des éléments de l'ouvrage ; elles ne produisent pas de bulles d'air durant le collage et ne nécessitent pas d'étais ni d'autre système de maintien provisoire.

Quant à leur durabilité et à leur résistance, elles ne subissent pas de corrosion ni d'autres attaques chimiques ; elles offrent une meilleure résistance au feu et à la fatigue.

Face au feu, que le renfort soit fait avec des platines en acier ou avec des lamelles, la ruine est provoqué par la dégradation de la résine époxy. Mais l'acier se dégrade beaucoup plus vite et présente des risques de chutes par décollage. Les CFRP, par contre, restent accrochées plus longtemps et la transmission de chaleur est moins rapide que dans l'acier ; de plus, comme elles sont légères, les risques d'accident sont écartés. [91]

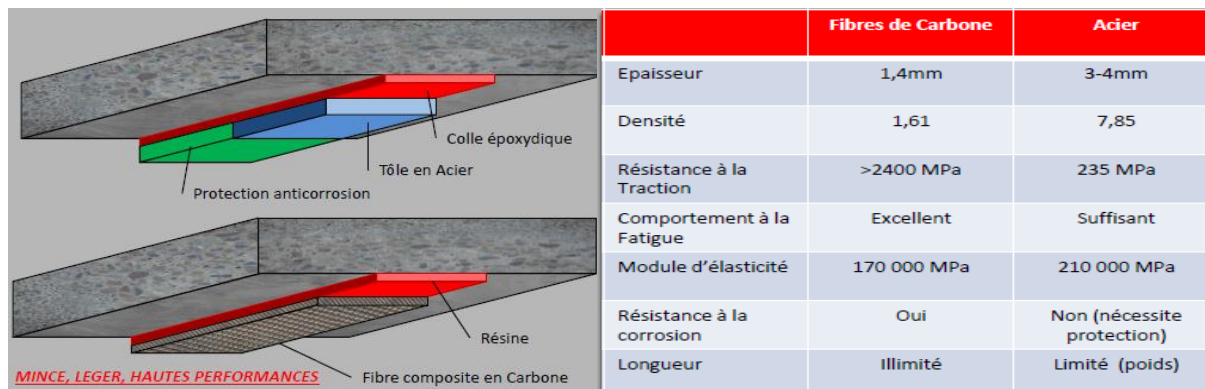


Fig. II.8. Comparaison entre le renfort avec des lamelles composites et le renfort avec des platines en acier [80]

II.5.CONCLUSION :

La réparation des ouvrages est devenue aujourd'hui une nécessité économique et un impératif technique dans la gestion des patrimoines. Elle implique des entreprises spécialisées qui cumulent une grande expérience, une maîtrise des moyens matériels et jouissants de compétences humaines de qualité.

Elle permet à moindre coût de réhabiliter des ouvrages et assurer ainsi leur état de service initial ce qui nous permet de nous économiser par ne pas recourir à la construction nouvelle.

Dans ce chapitre, on a présenté les différentes techniques de renforcement de structures en béton. Pour les techniques traditionnelles, les règles de dimensionnement sont connues et basées sur les principes de la statique et de la résistance des matériaux. Quant à la technique des lamelles collées, les règles ne sont pas encore complètes. De nombreuses études expérimentales sont actuellement en cours.

Aucun type de renfort ne peut être recommandé car il faut tenir compte des différentes contraintes : type de matériaux, fonction, usage et vie utile de la structure à renforcer, espace disponible pour l'exécution et l'exploitation, type d'élément structurel à renforcer et coût du renfort. C'est à l'ingénieur qu'il revient de choisir la solution la mieux adaptée à la situation, après en avoir étudié tous les paramètres.

Les progrès réalisés ces dernières années dans la formulation des produits organiques de synthèse permettent d'envisager l'utilisation du collage de matériaux composites. L'intérêt des solutions composites réside principalement dans les performances de tenue à la corrosion des polymères, à leur facilité de pose et de formage sur les structures à réhabiliter

La technique de réparation des structures par collage d'armatures de renfort a connu depuis peu un perfectionnement décisif : il s'agit de la substitution aux tôles d'acier traditionnelles de tissus composites souples à base de fibres de carbone, en abrégé TFC.

Les avantages du TFC sont nombreux :

- résistance et module élastique élevés,
- insensibilité à la corrosion,
- légèreté,
- grande souplesse de mise en œuvre sur des surfaces de toute forme et de toute nature,
- excellente résistance à la fatigue et à l'abrasion.

Pour toutes ces raisons, le TFC est promis à un brillant avenir dans le domaine du bâtiment et dans celui du génie civil.

CHAPITRE III :

MATERIAUX

COMPOSITES

III. MATERIAUX COMPOSITES

III.1. INTRODUCTION :

Les composites sont des matériaux synthétiques fabriqués avec des mélanges intimes (mais rarement chimiques) de matériaux de différent état, composition, et forme. Leurs composants sont toujours clairement différenciés et gardent leur identité séparée. Cependant, ils travaillent de manière solidaire dans le composite, en réunissant des caractéristiques qui ne sont pas atteintes séparément. Les composites sont constitués d'une matrice et de fibres. La matrice est le matériau qui donne le monolithisme à l'ensemble et la protection contre les attaques chimiques, l'abrasion, les intempéries, etc. Il peut s'agir de matériaux **thermostables** ou **thermoplastiques** dont la nature doit être adéquate et compatible avec la nature des fibres. Les fibres sont les éléments qui apportent les caractéristiques mécaniques. Parmi les plus connues, on peut citer : le carbone (haut module élastique et résistances mécaniques importantes à la fatigue), le verre (résistances moyennes, très utilisé pour renforcer les bétons) et l'aramide « Kevlar » (de haute résistance à la traction, utilisée en câbles de hautes performances). [67]

Dans des années récentes, l'utilisation de la technologie de polymère composite pour la réparation et renforcements des structuraux systèmes est devenue une mode. Une des applications avec succès est l'utilisation de l'externe composite renforcement pour la réparation et la réhabilitation des colonnes en béton armé dans les deux sismique et corrosif environnements. [30] Ce champ d'application s'élargit de plus en plus aux autres types de structures comme des poutres et des dalles. [31] où les bandes composites sont collées sur leur surface tendue dans l'espoir de réparer et d'améliorer leur capacité portante en flexion et dans le cas des maçonneries ou dans le cas de réparation du béton alcali-réactif. [61]

III. 2.HISTORIQUES :

D'une manière générale, les matériaux composites de type polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC) présentent beaucoup d'avantages dès qu'il s'agit de la protection, la réparation, le renforcement des ouvrages en béton et même le renforcement parasismique (Mallick, 1993). De nombreuses applications des PRFC sont intégrées dans le génie civil dans le monde entier. La première application du PRFC est dans la construction du pont « Strait of Gibraltar » (Meier, 1987), et plusieurs projets au Japon dans les années 80. En 1991, en l'espace de trois nuits, Urs Meier et son équipe ont fêté la première mondiale des lamelles de PRFC lors de la rénovation du pont de l'Ibach (1913-2001) dans le canton de Lucerne dont la capacité portante avait fortement diminué (Meier, 2002). Une dizaine d'années après, en 2000, environ 1500 structures en béton dans le monde ont été renforcées par les PRFC. Aujourd'hui, cette technologie de renforcement a fait ses preuves sur d'innombrables ouvrages de construction. Actuellement, les recherches se concentrent sur l'utilisation des PRFC au moyen de la précontrainte. Des renforcements à la flexion et au cisaillement en PRFC précontraints collés permettent de réduire l'ouverture des fissures et les déformations sur les structures en béton armé et de décharger leur

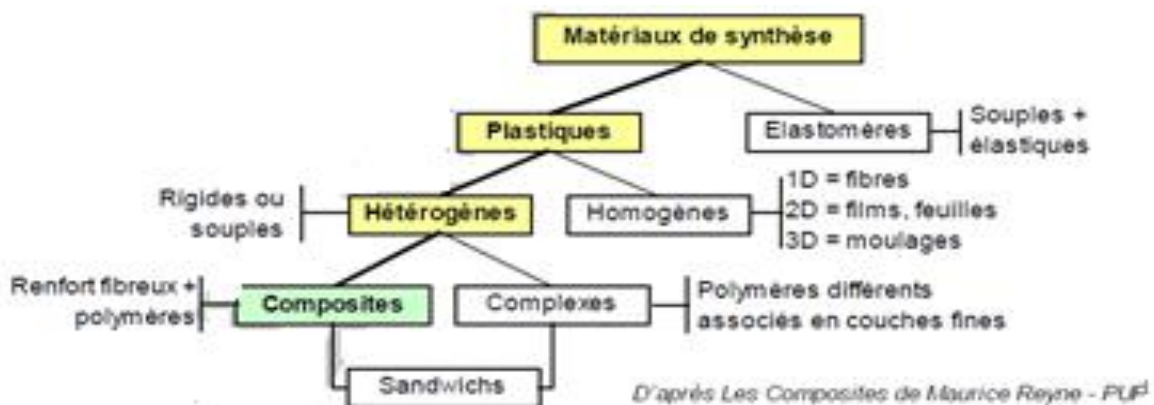
armature interne. Malgré ces avantages, le coût élevé des fibres de carbone (de 5 à 50 fois plus cher que l'acier) freine le développement commercial des PRFC. [67]

III. 3. DEFINITION DES MATERIAUX COMPOSITES :

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres, les *renforts* qui sont noyés dans une *matrice* dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces. Les matériaux ainsi obtenus sont très *hétérogènes* et *anisotropes*. [16]

III. 4. LA COMPOSITION DES MATERIAUX COMPOSITES :

Les matériaux composites sont composés d'une *matrice*, généralement une résine, et des, **fibres**. [16]



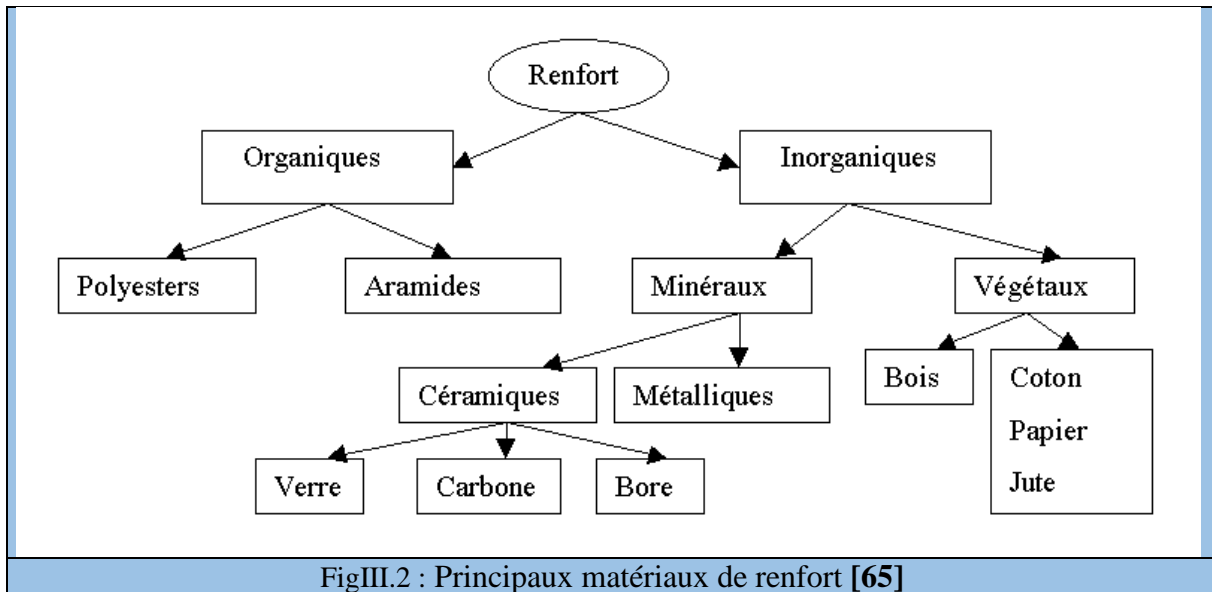
FigIII.1 : Arborescence des matériaux de synthèse [68]

III.4.1. Les fibres ou renfort :

Les fibres ont un diamètre compris entre 5 et 15 μ m. Dans le génie civil, elles peuvent être en carbone, verre ou aramide. Ces fibres ont une plus grande capacité de résistance à la traction que l'acier et elles ont un comportement élastique linéaire avant rupture. Les fibres de carbone sont les plus usitées grâce à leur grande rigidité et résistance à la traction (Tableau 1). Elles présentent un allongement à la rupture de 0,3 à 2,5%.

Les fibres de carbone n'absorbent pas l'eau, ne s'oxydent pas, ne montrent pas de fluage ni de relaxation. Cependant elles conduisent l'électricité et peuvent se dégrader en contact avec l'acier. Un des inconvénients majeurs de leur utilisation est leur prix très onéreux.

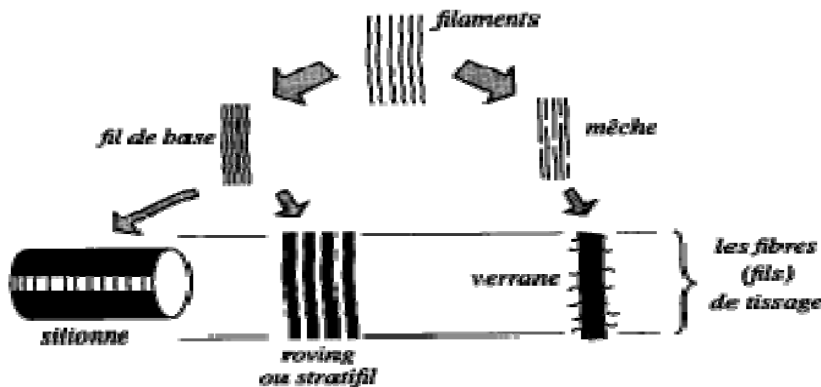
La résine époxy n'absorbe pas l'eau de façon significative (contrairement à d'autres polymères) mais elle peut être dégradée par les rayonnements UV (ce phénomène peut être bloqué avec des additifs). Le plus gros inconvénient est que cette résine est sensible aux fortes températures, il faut donc protéger le composite du feu lors de la conception des bâtiments si cette matrice est utilisée. [16]



III.4.1.1. Formes des renforts :

Afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des structures en composites, il est nécessaire de jouer sur la texture des renforts (*leur architecture*) pour créer une charpente résistante adaptée aux contraintes mécaniques. Les renforts se présentent généralement sous diverses formes : linéique, surfacique et structures multidirectionnelles. [65]

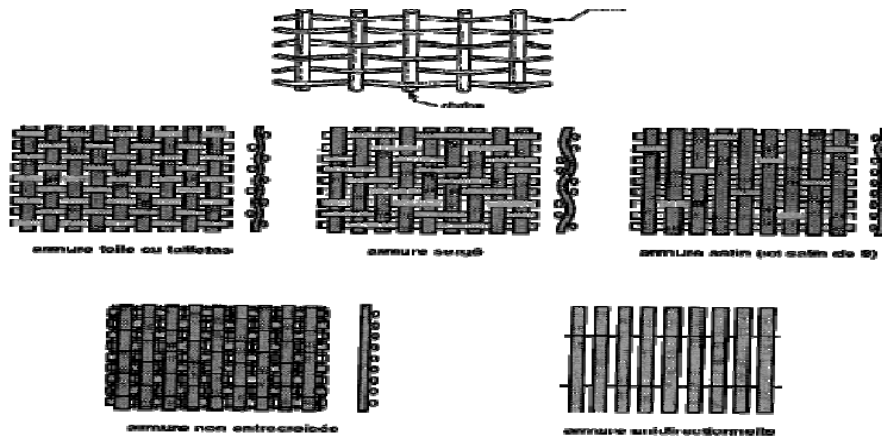
a- Formes linéiques : Une fibre (diamètre environ de **10 μm**) est trop petite pour l'utilisation unitaire. On trouve en général, des fils ou mèches qui sont assemblés à partir de plusieurs fibres. L'unité de masse linéique est le tex (**1 tex = 1 g/km**).



b- Formes surfaciques :

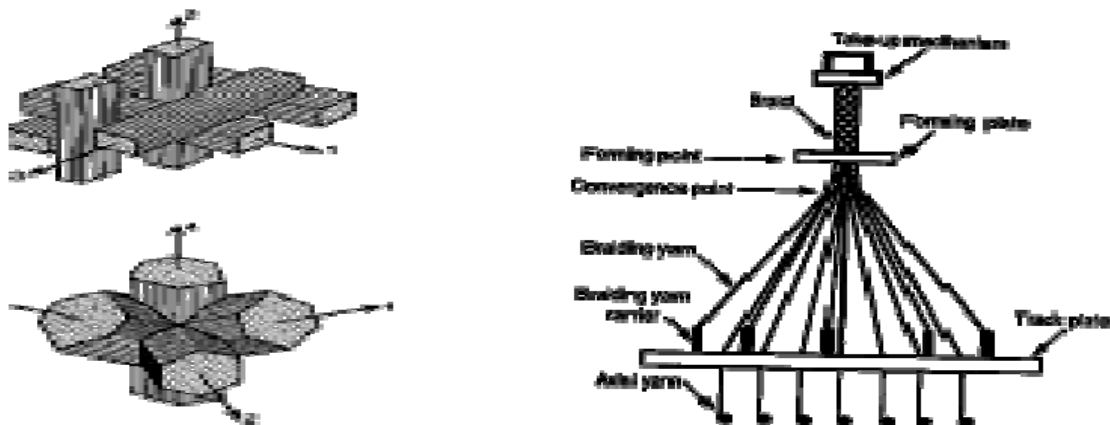
Tissus et rubans

Mats : Ce sont des nappes de fils continus ou coupés, disposés dans un plan suivant une direction aléatoire. Ils sont maintenus ensemble par un liant. Le mat est isotrope à cause de l'absence d'orientation préférentielle des fibres.



FigIII.4 : Eléments composants de la forme surfaciques [65]

c- Structures multidimensionnelles :



Multidirectionnels

Tissus Tresses et préformes

FigIII.5 : Eléments composants de la structure multidimensionnelle [65]

III.4.1.2.Types des fibres : Il y' a plusieurs types de fibres et on cite :

A. Fibre de verre : [84]

Elles sont en général fabriquées à partir de la fusion et de l'extrusion de silice associée à divers oxyde (alumine, alcalins, alcalinoterreux). On distingue différents types de fibre :

- **verre E** : le plus courant, il possède de bonnes propriétés diélectriques
- **verre D** : il est destiné aux applications de construction ou électronique, en raison de ses propriétés diélectriques supérieures aux autres fibres de verre
- **verre C** : il est très résistant chimiquement et est principalement utilise pour les Applications anticorrosion
- **verre R ou S** : il est destiné pour les applications haute performance du fait de sa résistance en traction et son module d'élasticité supérieurs aux autres fibres de verre



FigIII.6 : Fibre de verre [44]

Les fibres de verre sont fragiles et sensibles à l'abrasion. Pour cette raison, elles sont revêtues d'une résine ou ensimage qui a pour fonction de protéger les fibres mais qui favorise également l'adhésion de la matrice.

Tab III.1 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [46]

Caractéristiques	Type E	Type D	Type C	Type R	Type S
Résistance en traction (MPa)	3500	2450	2800	4650	4650
Module en traction (GPa)	73.5	52.5	70	86.5	86.5
Allongement à la rupture (%)	4.5	4.5	4.0	5.3	5.3

B. Fibre de carbone :

Les fibres de carbone sont pour la plupart obtenues à partir d'une fibre précurseur de type poly acrylonitrile (PAN).

Ces fibres subissent une étape d'oxydation pour faire réticuler le PAN et le rendre ainsi moins « fusible » en vue des traitements thermiques ultérieurs. Elles sont ensuite soumises à une seconde étape, qui peut être une carbonisation à 1500°C ou à une graphitisation à 3000°C. Pendant cette étape, les fibres sont maintenues sous tension afin de conserver l'orientation de la structure moléculaire. Dans le premier cas, on obtient des fibres haute résistances ou HR, et dans le deuxième cas, on obtient des fibres haut module ou HM (Tab III.2).

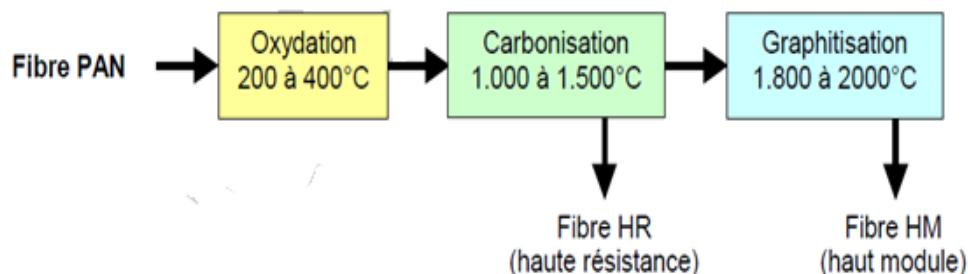


FigIII.7 : Fibre de carbone [44]

Il existe également des fibres de module intermédiaire, appelée inter médiate modules ou IM. Elles peuvent ensuite passer dans un électrolyte ou subir une oxydation pour créer des groupements polaires, destinés à favoriser l'enzymage. [84]

Selon la température de combustion, on distingue : [44]

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

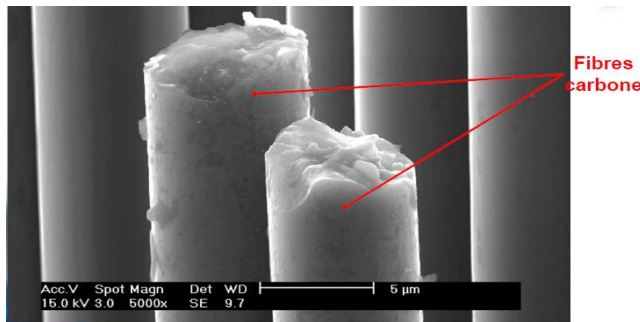


FigIII.8 : production de fibres de carbone [68]

Tab III.2 : Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone [12]

Caractéristique	Fibres HR	Fibres HM	Fibres IM
Résistance en traction (MPa)	3400/4500	2000/2500	4800
Module en traction (Gpa)	230/250	390/450	296
Allongement a la rupture (%)	1.4/1.8	0.5/0.6	2.0
Résistance en compression (Mpa)	2200/2800	1300/1700	-

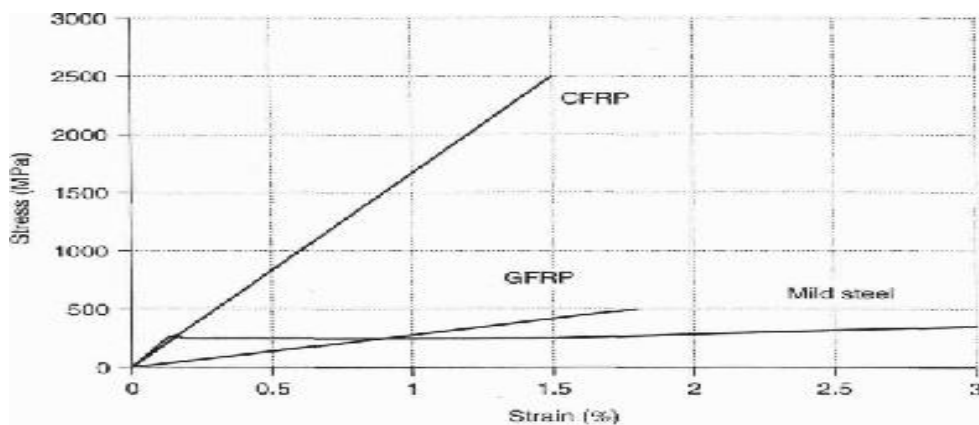
Les fibres de carbone continues sont disponibles sous diverses formes de mèches de 3000 a 24000 filaments, de fibres coupées, de rubans ou bien encore de tissus, qu'ils soient uni ou multidirectionnels. Elles présentent des caractéristiques spécifiques élevées comme leur haut module en traction. Elles ont également un coefficient de dilatations très faibles, une conductivité thermique élevée. En revanche, certains inconvénients demeurent comme leur résistance limitée aux chocs, une faible résistance à l'abrasion. [84]



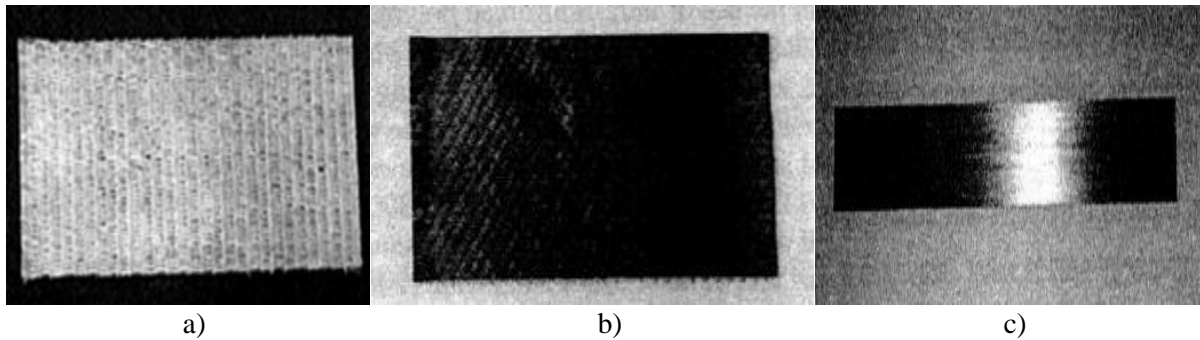
FigIII.9 : Vue d'un tissu [82]

❖ **Procédés de fabrication des fibres de carbone :**

Les fibres de carbone sont obtenues à partir des précurseurs sous forme de filament. Les fibres utilisées sont les fibres acryliques d'origine poly acrylonitrile (PAN) ou les fibres élaborées à partir du brai (Pitch). Les fibres sont oxydées à chaud (3000 °C) puis chauffés à 15000 °C dans une atmosphère d'azote (carbonisation). Le module d'élasticité élevé est obtenu par filage à chaud (*graphitisation*). Les fibres de carbone contiennent environ 95% de carbone tan disque les fibres de graphite en contiennent près de 99%. [65]



FigIII.10 : Courbes contrainte-déformation typiques des composites et l'acier doux. [65]



FigIII.11 : Différents types de Composite : (a) tissu de fibre de verre ; (b) deux feuillets de fibre de carbone ; (c) plat préfabriqué de fibre de [65]

Tab III.3 : Exemples de caractéristiques mécaniques des fibres de carbone de composites unidirectionnels comparées à celles de l'acier [28]

Propriétés	Unité	Fibres de carbone		Aciers	
		Torayca H.R. T 300/T 300J/T 700SC	Composites (1) carbone	Type E 235	Haute résistance
Densité		1,75 à 1,80	1,53	7,85	7,85
Propriétés mécaniques (sens longitudinal)					
Traction					
Contrainte à la rupture	MPa	3 530 à 4 900	1 760 à 2 500	315	1 860
Module	GPa	230	125 à 165	210	210
Limite d'élasticité	MPa	3 530 à 4 900	1 760 à 2 500	235	1 600
Allongement à la rupture	%	1,5 à 2,1	1,1 à 1,9	23	3 à 7
Compression					
Contrainte à la rupture	MPa		1 370 à 1 570	315	1 860
Module	GPa		125 à 165	210	210
Propriétés mécaniques (sens transversal)					
Traction					
Contrainte à la rupture	MPa		80	315	
Module	GPa		7,8 à 8,8	210	
Limite d'élasticité	MPa		65 à 80	235	
Allongement à la rupture	%		0,9 à 1,1	23	

1) Pour une fraction volumique en fibres de carbone (de 3 000 à 24 000 mono filaments) égale à $V_f(C) = 60 \%$, matrice résine époxyde.

C. Fibre d'aramide : elles sont issues de la chimie organique des polyamides aromatiques (ou polyaramide) par synthèse chimique à basse température ; ses propriétés diffèrent des polyamides aliphatiques classiques. Les composites renforcés de fibres d'aramide offrent une bonne stabilité en température (Jusqu'à 200°C en fonction de la matrice) mais souffrent :

- ❖ d'une adhérence moyenne entre matrice et fibre
- ❖ d'un prix encore trop élevé. [65]



FigIII.12 : Fibre d'aramide [44]

D. Fibre de bore :

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.[44]

E. Fibre de silice (ou de quartz) : [4]

Cette fibre, obtenue à partir du quartz ou de silice par fusion, est surtout utilisée dans les composites à haute tenue thermique (bonnes propriétés d'ablation avec des résines phénoliques)

F. Fibres de polyéthylène de haut module :

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester. [44]

III.4.1.3.Caractéristiques moyennes des fibres et renforts : les caractéristiques des fibres sont résumées dans (Tab III.4) [53]

Tab III.4 : Caractéristiques moyennes des fibres [53]

Renforts	Diamètre du filament (µm)	Masse volumique (kg.m-3)	Module d'élasticité longitudinal (Mpa)	Module de cisaillement (Mpa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C-1
	D	δ	E	G	μ	Sr	A	a
Verre E	16	2600	74000	30000	0.25	2500	3.5	0.5*10 ⁻⁵
Verre R	10	2500	86000	-	0.2	3200	4	0.3*10 ⁻⁵
Carbone HM	6.5	1800	390000	20000	0.35	2500	0.6	0.08*10 ⁻⁵
Carbone HR	7	1750	230000	50000	0.3	3200	1.3	0.02*10 ⁻⁵
Kevlar 49	12	1450	130000	12000	0.4	2900	2.3	-0.2*10 ⁻⁵
Bore	100	2600	400000	-	-	3400	0.8	0.4*10 ⁻⁵
Silicate d'alumine	10	2600	200000	-	-	3000	1.5	-
Polyéthylène	-	960	100000	-	-	3000	-	-

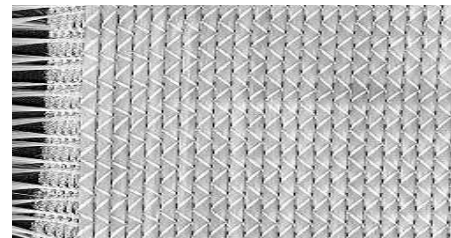
Tab III.5 : résumé des principales propriétés [38]

Type de fibre	\varnothing (μm)	E (GPa)	σ_{max} (MPa)	ε_R (%)	T_{max} ($^{\circ}\text{C}$)	densité	prix (euros / kg)
PA66 (nylon)	20	≤ 5	1000	20	190	1,2	3
PET (polyester)	15	≤ 18	1250	15	< 260	1,38	2
PPTA (Kevlar)	12	135	3450	3	300	1,45	40
PBO (Zylon)	12	180-270	5800	3	280	1,55	122
verre E	15	73	3400	4	250	2,54	2
verre S	15	86	4500	5,3	300	2,49	20-37
carbone (préc. PAN)	5-7	230-590	3000-7000	0,7-2	400 (sous air)	1,9	10-13 grosses mèches
carbone (préc. brai)	10	390-830	3800	0,2-1	3000 (à l'abri de l'oxygène)	2	20-45 (module bas ou intermédiaire) 70 (haut module)
SiC (âme W)	100-140	400-430	3800	0,8	800	3,4-2,7	5000
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-4SiO}_2$ (Saffil) (fibres courtes)	3	300	2000	0,7	350 sous σ ≥ 1500 sinon	3,2	45
$\text{Al}_2\text{O}_3 \alpha$ continue	12	373	1900-3100	0,5	1000	3,9	330-660
SiC	14	390	1000	0,4	1400	2,7	10000
Coton (discontinue)	20	6-10	300-600	6-8	110-130	1,52-1,56	1,5-3

III.4.1.4. Architecture des renforts :

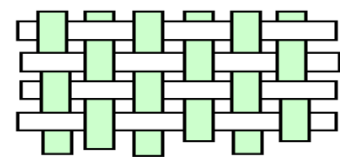
Les structures composites sont **anisotropes**. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée. Il existe différentes géométries et textures de renforts : [44]

✚ **Les unidirectionnels (UD)** : Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand. Les tissus se composent de fils de chaîne et de trame perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise. [44]



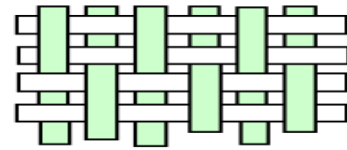
FigIII.13 : Renfort unidirectionnels [44]

✚ **Toile ou taffetas** : Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques. [44]



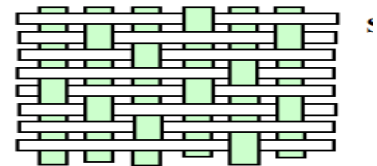
FigIII.14 : Toile ou taffetas [55]

- ✚ **Serge** : Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. Ci-contre, un sergé 2/2. [44]



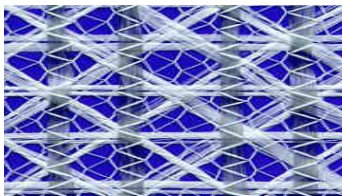
FigIII.15 : Serge [55]

- ✚ **Satin** : Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n- 1) fils de trame et réciproquement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes.

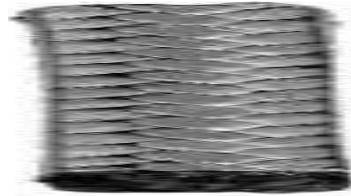


FigIII.16 : Satin [55]

Ce type de tissus présente une forte masse spécifique. Comme un tissu est difficilement déformable sur une surface gauche, on réalise également pour des utilisations spécifiques de l'armure bi ou tridimensionnelle. Il est également possible de réaliser des structures de renforts hybrides en tissant des fibres de natures différentes ou, en superposant des tissus ou nappes de renforts de fibres différentes. [44]



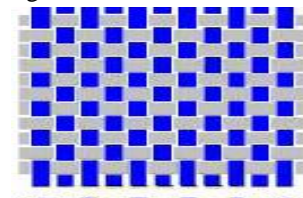
FigIII.17 : Tissu multiaxial [44]



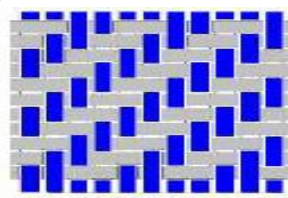
FigIII.18 : Tissu 3D [44]



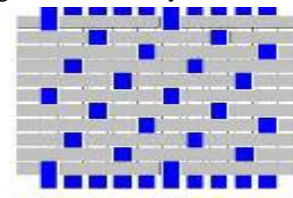
FigIII.19 : Tissu hybride [44]



FigIII.20 : Tissu taffetas [52]



FigIII.21 : Tissu Serge 2*2[52]



FigIII.22 : Tissu Satin de 5[52]

✚ Ensimage

Les renforts destinés à la fabrication des composites reçoivent un ensimage. L'ensimage est une dispersion aqueuse spécifique comportant un agent collant, un agent pontant et des antistatiques, permettant d'assurer différents rôles :

- compatibilité de la liaison fibre - matrice
- cohésion inter filamentaire (raideur du fil) pour qu'il soit manipulable
- protection contre l'abrasion générée par la mise en œuvre (frottement contre pièces métalliques)
- élimination des charges électrostatiques dues aux frottements
- augmentation du mouillage de la fibre au cours de l'imprégnation.

L'ensimage est spécifique pour une résine et un procédé donné. [44]



FigIII.23 : Architectures de renforcement [68]

Les performances résultantes de ces différents types d'architecture sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tab III.6 : Performances comparées des différents types d'architecture [68]

Architecture des fibres	Comportement Mécanique recherché	Orientation de la tenue mécanique	Taux maximal de renfort	Type de fibres
Fibres coupées et broyées	Moyen	quelconque	30%	verre
Mats fibres coupées	Moyen	quelconque	30%	verre ou carbone
Mats fibres continues	Moyen	orientée	30%	verre
Fibres continues	Intermédiaire	unidirectionnelle	50 à 70%	toutes
Tissu	Fort	bi ou tri directionnelle	30 à 70%	toutes
Nappe	Très fort	Unidirectionnelle (Bidirectionnelle si superposition)	50 à 85%	toutes

III.4.2. Les charges :

On désigne sous le nom général de **charge** toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé. A l'inverse des matières *thermoplastiques*, les matières *thermodurcissables* ont toujours contenu des charges de nature et de forme variée, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60 % en masse. Pour un polymère donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour l'objet fini. Mais, d'une manière générale, les substances utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences :

- Compatibilité avec la résine de base
- Mouillabilité
- Uniformité de qualité et de granulométrie
- Faible action abrasive
- Bas prix de revient [44]

III. 4.3. La matrice :

La matrice a pour rôle de maintenir la cohésion entre les fibres, de les protéger de l'environnement extérieur et de transmettre les efforts entre elles. Dans le génie civil, les résines thermodurcissables comme les vinylesters ou les poly époxydes (appelées époxy par abus de langage) sont souvent utilisées. La résine époxy présente une résistance à la traction plus importante que les résines polyesters comme indiqué dans le Tableau (Tab III.7).

La résine époxy n'absorbe pas l'eau de façon significative (contrairement à d'autres polymères) mais elle peut être dégradée par les rayonnements UV (ce phénomène peut être bloqué avec des additifs). Le plus gros inconvénient est que cette résine est sensible aux fortes températures, il faut donc protéger le composite du feu lors de la conception des bâtiments si cette matrice est utilisée. Cette résine époxy n'est pas prête à l'emploi, il faut la mélanger à un durcisseur avant de l'appliquer. Une fois ce mélange réalisé, il doit être appliqué rapidement puisque l'ajout de durcisseur diminue considérablement le temps de vie en pot de la résine époxy. [16]

Tab III.7 : Principales différences entre matrices TP et TD [44]

Matrices	Thermoplastiques TP	Thermodurcissables TD
Etat de base	solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage	illimité	réduit
Mouillabilité renforts	difficile	aisée
Moulage	chauffage+ refroidissement	chauffage continu
Cycle	court	long
Tenue au choc	assez bonne	limitée
Tenue thermique	réduite	bonne
Chutes et déchets	recyclables	perdus ou recyclés en charges
Conditions de travail	propreté	Emanation pour méthode humide

III. 4.3.1. Les résines thermodurcissables :**a). Polyesters insaturés :**

Les deux principales résines utilisées sont les polyesters (environ 70%) et les époxydes (25%). D'autres familles comme les résines phénoliques, les polyuréthanes ou les polyimides sont également rencontrées. Ces matrices se présentent sous forme d'une résine initialement à l'état de liquide visqueux, composée de molécules longues et indépendantes. Ces molécules établissent alors des liaisons, et ces réactions sont déclenchées le plus souvent grâce à l'action conjointe d'un durcisseur et de la température. Il se forme ainsi une structure solide tridimensionnelle. Cette réaction est irréversible.

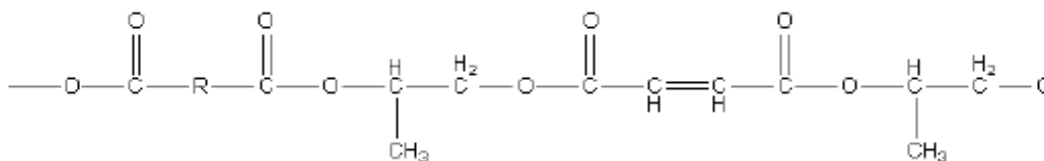
On rencontre le plus fréquemment des polyesters insaturés. Ces derniers sont obtenus par polycondensation d'un ou plusieurs glycol(s) sur un ou plusieurs diacide(s). [84]

Il existe différents types de résines : [44]

- Ortho phtalique : la plus courante ;
- Iso phtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité
- Chlorée : apportant une auto extinguable
- Bisphénol : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques.

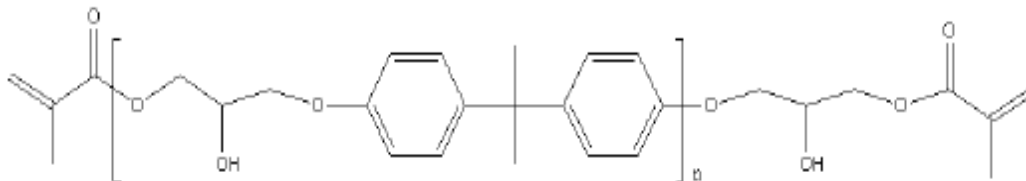
Tab III.8 : Les avantages et les inconvénients Polyesters insaturés [44]

Avantages	Inconvénients
Bonne accroche sur fibres de verre	Inflammabilité (sauf résines chlorées)
Translucidité	Tenue vapeur et eau bouillante
Bonne résistance chimique	Retrait important (6 à 15 %)
Mise en œuvre facile	Durée de conservation en pot limitée
Tenue en température (> 150 °C)	Emission de styrène
Prix réduit	



FigIII.24 : Composition d'une résine polyester [84]

b).Vinylesters : ce sont des variantes des polyesters obtenues à partir d'acide acrylique. Elles ont une bonne tenue à la fatigue et un bon comportement à la corrosion mais sont combustibles. [68]



FigIII.25 : Structure moléculaire d'une résine vinylester [84]

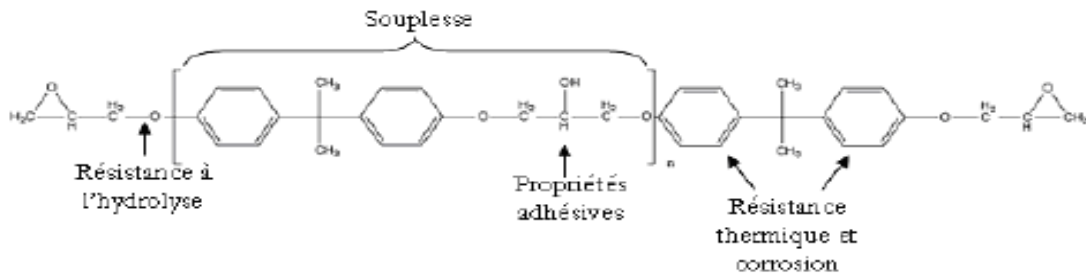
c).Phénoliques : sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol ; elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée (d'où leur utilisation dans le ferroviaire). Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en œuvre. [68]

d).Epoxydes : les **résines époxy** (ou époxydes) constituent la résine type des composites HP [68] On distingue deux classes de résines en fonction : [44]

- Du durcissement à chaud ou à froid
- De la tenue en température (120-130 °C, ou 180-200 °C)

Tab III.9 : Les avantages et les inconvénients de l'époxyde [44]

Avantages	Inconvénients
Tenue mécanique, thermique, chimique et fatigue	Prix élevé
Faible retrait (1 à 2 %)	Sensibilité à l'humidité et aux UV
Excellente adhérence sur fibres	Vieillessement sous température
Auto-extinguibilité	Sensibilité aux chocs
Mise en œuvre facile, sans solvant	Temps de polymérisation



FigIII.26 : Formulation générale de la résine DGEBA [84]

Tab III.10 : Propriétés mécaniques des résines époxydes [8] [33]

Caractéristiques	Valeur moyenne
Résistance à la traction (MPa)	70 à 80
Allongement à rupture en traction (%)	1 à 1,5
Résistance à la compression..... (MPa)	140 à 150
Résistance à la flexion..... (MPa)	110 à 130
Allongement à rupture en flexion (%)	1,2 à 1,7
Module de traction (GPa)	3 à 10
Coefficient de Poisson.....	0,35

Tab III.11 : Caractéristiques mécaniques des résines thermodurcissables [6]

Résine	Propriétés physiques			
	Résistance en traction (MPa)	Module en traction (GPa)	Déformation a rupture (%)	Température Maximale d'utilisation (°C)
Ortho/phtalate	60	3,6	2,5	85
Iso/phtalate	75	3,5	1,5	110
Vinyle/ester	75	3,3	2,5	100
Epoxydes	70	3,5	2,5	130

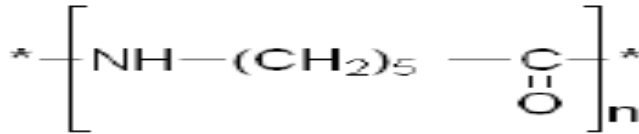
e).**Polyuréthannes et polyurées** : Dans l'application composites, on utilise surtout des formules élastomériques dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule. Les constituants sont livrés à l'état de prépolymères liquides :

- Polyols + polyisocyanates = polyuréthannes
- Polyéthers + polyamines = polyurées. [44]

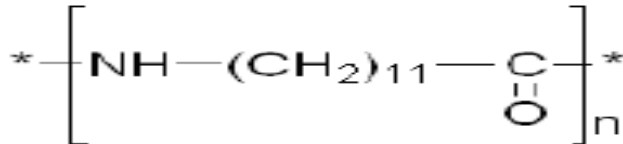
Tab III.12 : Les avantages et les inconvénients Polyuréthannes et polyurées [44]

Avantages	Inconvénients
Facilité de moulage in situ	Résistance mécanique réduite
Tenue chimique	Combustibilité
Vieillessement	Coloration en masse difficile : foncée
Astaticité	

f).Polyimides : Ces résine sont surtout utilisées dans les composites HP, lorsque l'on cherche une bonne stabilité sous hautes températures (> 250 °C). Elles restent toutefois très onéreuses et difficiles à mettre en œuvre. [44]



FigIII.27 : Formule chimique du polyamide 6 [84]



FigIII.28 : Formule chimique du polyamide 12 [84]

g).Bismaldéides : Matrices très peu utilisées en Europe. Elles offrent une bonne tenue à la fois au choc et en température, mais restent difficiles à mettre en œuvre. [44]

Tab III.13 : Matrices TD [44]

Matrices TD	Masse volumique (kg.m-3)	Module d'élasticité longitudinal (Mpa)	Module de cisaillement (Mpa)		Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C-1
	δ	E	G		μ	Sr	A	a
Epoxyde	1200	4500	1600		0.4	130	2	11*10-5
Phénolique	1300	3000	1100		0.4	70	2.5	1*10-5
Polyester	1200	4000	1400		0.4	80	2.5	8*10-5
Polycarbonate	1200	2400	-		0.35	60	-	6*10-5
Vinylester	1150	3300	-		-	75	4	5*10-5
silicone	1100	2200	-		0.5	35	-	-
Uréthane	1100	700à7000	-		-	30	100	-
Polyimide	1400	4000à19000	1100		0.35	70	1	8*10-5

III. 4.3.2.Les matrices thermoplastiques [68] : Les thermoplastiques (TP) présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement de fibres courtes leur confère une tenue mécanique et thermique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle. Toutefois, l'appellation « composite » n'est pas interprétée d'une manière uniforme, et certains industriels n'y incluent pas les thermoplastiques renforcés de fibres courtes qui représentent pourtant **90% des composites à matrice thermoplastique**.

Les principales résines thermoplastiques utilisées dans les composites sont :

- les polyamides (PA) 6, 6-6, 12
- les polytéraphthalates éthylénique (PET) et butylénique (PBT)
- les polycarbonates (PC)
- les polyoxides de phénylène (PPO ou PPE)
- les polyoxyméthylène (POM)
- le polypropylène (PP) est un polymère semi-technique, peu onéreux, assez stable en température, mais combustible.

D'autres résines TP commencent à être utilisées pour leurs propriétés de thermo-stabilité (tenue thermique supérieure à 200°C) et de bonne tenue mécanique :

- le polyamide-imide (PAI)
- le polyéther-imide (PEI)
- le polyéther-sulfone (PES)
- le polyéther-éther-cétone (PEEK)

Le Tableau III.14 résume les caractéristiques des polyamides 12 et 6.

Tab III.14 : Caractéristiques du polyamide 6 et du polyamide 12 [34]

	Polyamide 12	Polyamide 6
Densité	1.01	1.13/1.15
Température de fusion	172/180°C	218/220°C
Module élastique	1450 MPa	3200 MPa
Limite d'élasticité	47 MPa	90 MPa
Déformation a la rupture	5%	23%
Coefficient de dilatation	0.35.10/4 °C-1	0.24.10/4 °C-1

Tab III.15 : Matrices TP [44]

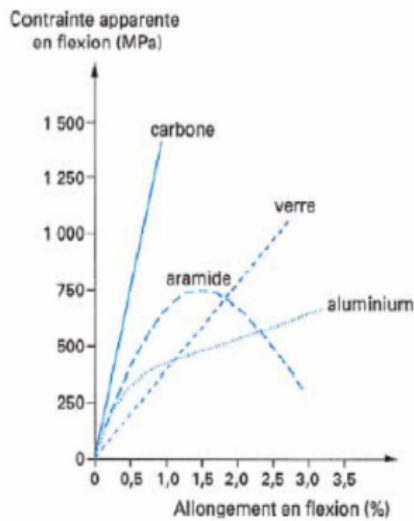
Matrices TP	Masse volumique (kg.m-3)	Module d'élasticité longitudinal (Mpa)	Module de cisaillement (Mpa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C-1
	δ	E	G	μ	Sr	A	a
PP	900	1200	-	0.4	30	20à400	9*10-5
PPS	1300	4000	-	-	65	100	5*10-5
PA	1100	2000	-	0.35	70	200	8*10-5
PES	1350	3000	-	-	85	60	6*10-5
PEI	1150	3300	-	-	105	60	6*10-5
PEEK	1300	4000	-	-	90	50	5*10-5

III. 4.4.Principales combinaisons de résines et de renforts :

Le tableau ci-dessous présente une synthèse des combinaisons matrices/renfort les plus couramment utilisées donnant lieu à des composites « hautes performances » (HP) ou « grande diffusion ». On notera que les composites « hautes performances » (HP) se distinguent essentiellement des composites « grande diffusion » (GD) par leurs meilleures propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la traction) et, corollairement, par leur coût plus élevé. [68]

Tab III.16 : Tableau de synthèse de l'utilisation des résines et renforts [68]

Résines		Fibres de renfort				
		Verre E	Verre D	Verre R	Carbone	Aramide
Thermodurcissables TD	Polyesters	GD	GD			
	Phénoliques	GD				
	Polyuréthanes	GD				
	Epoxy		HP	HP	HP	HP
Thermoplastiques TP	Polypropylènes	GD				
	PA 6 et 6-6	GD		HP		
	PA 12, PEEK			HP	HP	HP



Comportement en flexion des composites unidirectionnels à base de résine époxyde avec différents renforts fibreux (carbone, verre, aramide)

FigIII.29 : Comportement en flexion des composites avec différents renforts fibreux [82]

III. 5. LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DES MATERIAUX COMPOSITES : [72]

- ❖ **LES AVANTAGES :** L'intérêt des utilisations de la fibre de carbone dans le génie civil se trouve essentiellement dans :
 - faciles et rapides à mettre en œuvre, très bonne adaptabilité aux diverses géométries (tissu souple)
 - insensibles à la corrosion
 - légers, n'apportent pas de masse à la structure
 - très bonnes caractéristiques mécaniques
 - sa faible densité
 - ses propriétés mécaniques longitudinales
 - sa très bonne tenue à la fatigue
 - présente de meilleures propriétés mécaniques (traction, flexion) [84]
 - Les fibres de carbone présentent en revanche une plus faible perméabilité aux matrices et demandent davantage de temps pour être imprégnées [84]
- ❖ **LES INCONVENIENTS :**
 - une anisotropie très marquée ;
 - un comportement à la rupture de type fragile des composites ;
 - un prix de matière élevé comparé à celui de l'acier.

III. 6. MISE EN OUVRE :

Le TFC peut être appliqué sur tous les matériaux de constructions usuels : béton armé ou précontraint, charpente métallique, bois maçonnerie. Cependant, afin d'éviter une délamination prématurée, il convient de s'assurer de la résistance mécanique du support : le béton, par exemple, doit présenter une résistance à la compression au moins égale à 20 MPa. La surface de support doit être convenablement nettoyée, dégraissée, et débarrassée de toute particule non adhérente ou susceptible d'amoindrir la résistance du collage ; c'est le cas pour la rouille de l'acier, pour la laitance du béton, qu'il convient d'éliminer par sablage. Une première couche de résine est appliquée à la brosse ou au rouleau à raison de 700 gr/m² environ. Puis le tissu est appliqué sur le support et marouflé au rouleau de façon à obtenir par imprégnation un contact

intime entre les fibres du tissu et la résine, qui doit ressuer sur toute la surface du renfort. La pose est effectuée par application d'un tissu sec sur une couche de résine humide. Ce procédé permet d'éviter la formation de poches d'air occlus dans le plan de collage car l'air s'échappe à travers les mailles du tissu. Après le marouflage, une couche de fermeture de la même résine est appliquée à la spatule sur le tissu à raison de 700 gr/m² environ. Pour certaines finitions et en particulier dans le cas où l'isolation thermique est demandée, il est possible de projeter sur la résine encore humide un sable fin ou autre matériau susceptible de créer une interface support du revêtement final. [65]

III.6.1. Préparation de la surface du béton :

La surface du béton doit être bien préparée afin d'éviter la rupture à l'interface résine béton par suivre un procédé adéquat. Une bonne préparation extérieure du béton exige une importante maintenance, est que les surfaces de béton irrégulier sont réglés (Meier 1995).

- Préparation du support :
 - Décapage
 - Elle consiste au sablage



- Nettoyage et brossage des surfaces qui peuvent être humides :



- Préparation des fissures par injection de la résine de réparation :



III.6.2. Adhésif :

Les adhésifs forts sont disponibles pour le collage de la plaque de PRF, et leur force excède généralement sur le béton, donc la rupture dans l'adhésif est rare. Cependant, si des adhésifs faibles sont employés ou si les adhésifs sont incorrectement appliqués, la rupture adhésive peut se produire dans la couche adhésive, sur les faces superposées de PRF (Meier 1995, Karbhari *et al* 1998, Leeming *et al* 1999).

- Préparation de la colle et encollage :

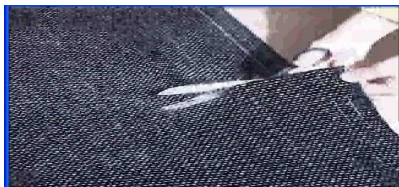


III.6.3. Préparation de la surface du renfort :

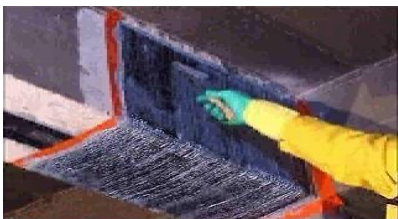
Pour les plaques de composites, la rupture peut se produire aussi à l'interface de composite résine si la surface de la plaque de carbone n'est pas correctement préparé (par exemple déplacement inadéquat, des impuretés comme par exemple : graisse sur la surface).



- Pour les tissus :
 - Découpe du tissu
 - Application au rouleau, d'une couche de résine d'accrochage du tissu
 - Mise en place de la bande ou sur la surface à renforcer



- Application au rouleau, d'une couche de résine d'accrochage sur la surface extérieure :



- renfort éventuel de la fixation des extrémités par mise en œuvre de chevilles TFC
- passage de la bande dans l'imprégnateur
- passage rouleau du maroufleur imprégnateur

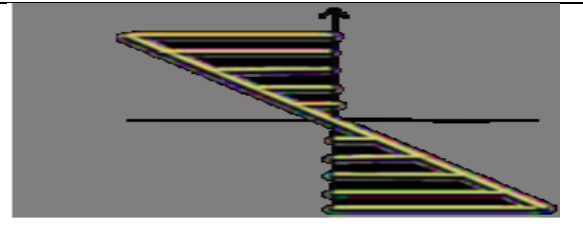
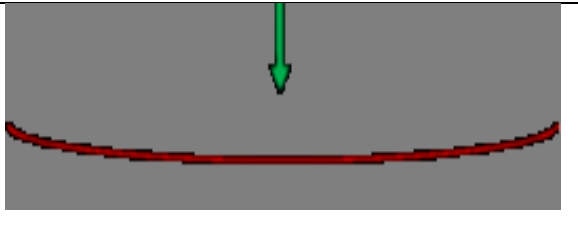
III. 7. EFFETS ATTENDUS DU RENFORCEMENT : [16]

La plupart des tests effectués pour tester un matériau sont des tests en traction, compression et flexion. Ce paragraphe détermine les sollicitations auxquelles sont soumises les éprouvettes lors d'une flexion ainsi que les améliorations attendues d'un renforcement réussi avec CFRP.




		
<p>FigIII.30 : Mise en œuvre de bandes de renforts sur un pont [18]</p>	<p>FigIII.31 : Réparation des poutres du pont de Gagnac-France par matériaux composites [6]</p>	<p>FigIII.32 : Renforcement à l'aide de TFC [26]</p>

III.7.1. Le test en flexion :

Le test de flexion sollicite les fibres supérieures des éprouvettes en compression et les fibres inférieures de l'éprouvette en traction. Cette contrainte de flexion est maximale sur les fibres externes de l'éprouvette. La fibre neutre, qui est la seule à ne pas subir de déformation ni de traction ou compression, est la plus sollicitée en cisaillement.

	
<p>FigIII.33 : Contrainte de flexion appliquée sur une éprouvette de section homogène [16]</p>	<p>FigIII.34 : Schéma de renforcement d'une poutre soumise à la flexion [16]</p>

Lors de ces tests, la première déformation observée est celle du matage du bois. Il s'agit d'un écrasement localisé des fibres à cause de la pression occasionnée par la traverse du banc d'essai au contact de l'éprouvette, au niveau du point d'application de la force. Le matage correspond à une déformation dans le domaine plastique des fibres. Il n'y a donc pas de rupture de l'éprouvette à cet endroit. Au cours de l'essai, les fibres inférieures et supérieures sont de plus en plus sollicitées respectivement en traction et en compression. Comme la valeur caractéristique de la résistance en traction axiale est plus faible que celle en compression axiale, il est attendu que l'éprouvette casse au niveau des fibres inférieures. [16]

		
<p>FigIII.35 : Vue du pont durant les opérations de renforcement [82]</p>	<p>FigIII.36 : Renforcement de la pile de pont par TFC [76]</p>	<p>FigIII.37 : Poutre renforcée par TFC [76]</p>

III.8.CONCLUSION :

Les fibres de carbone avec les avantages présentés précédemment, présentent la solution adéquate pour les travaux de réhabilitation et de réparation des structures en béton armé. Leur utilisation dans le domaine du génie civil a connu un développement important ces dernières années, cette utilisation a permis aux chercheurs d'étudier d'une manière profonde le comportement, les limites d'utilisation et l'efficacité de ce renfort.

Les méthodes de l'utilisation de ce type de renfort dans le génie-civil résident essentiellement sur des observations structurelles ainsi que sur l'expérience de l'ingénieur et leur distribution sur les zones endommagées restent, plutôt, aléatoire. Pour une distribution optimisée, une méthode de dimensionnement rigoureuse s'impose.

CHAPITRE IV :

L'INDUSTRIE

ET LE MARCHE

DES MATERIAUX

COMPOSITES

IV. L'INDUSTRIE ET LE MARCHÉ DES MATÉRIAUX COMPOSITES

IV.1. INTRODUCTION :

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions. Dans chacun des marchés d'application (automobile, bâtiment, électricité, équipements industriels,...), ces performances remarquables sont à l'origine de solutions technologiques innovantes. Cependant, pour faire valoir ces atouts et atteindre ses objectifs, l'industrie des matériaux composites doit mieux intégrer dans sa stratégie de croissance la composante environnementale du développement durable. Les évolutions réglementaires en termes de recyclable et d'hygiène et sécurité constituent également des enjeux forts que cette industrie doit relever pour maintenir sa croissance. , pour maîtriser l'impact environnemental des produits tout au long de leur cycle de vie. Le secteur des matériaux composites, comme les autres, est concerné par ces mesures. [68]

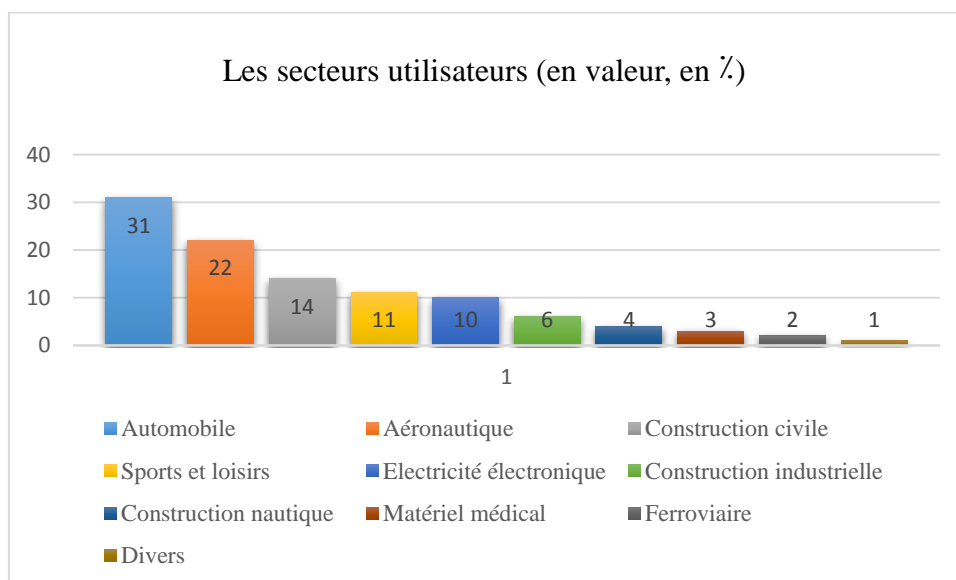


Fig. IV.1 : Les secteurs utilisateurs(en valeurs, en %) [60]

IV.2.PRINCIPALES RAISONS DE LEURS IMPLANTATION :

Plusieurs raisons ont permis à ces matériaux nouveaux de s'implanter dans l'industrie, y compris dans le domaine des travaux publics : [28]

- ✚ **Des raisons politiques** : la chute du mur de Berlin et l'effondrement du bloc de l'Est ont brutalement changé les mentalités. Les producteurs des matériaux nouveaux étant souvent limités à des utilisations dites stratégiques, le manque brutal de commandes militaires les a obligés à rechercher d'autres marchés ;
- ✚ **Des raisons économiques** : dès 1992, l'industrie aéronautique a traversé une crise très importante. Les commandes d'avions ont brutalement chuté ;
- ✚ **Des raisons géographiques** : le Japon est le pays le plus avancé dans les constructions parasismiques renforcées par des composites. Depuis le séisme de Kobe (1995), de nouvelles normes drastiques sont appliquées. Cependant d'autres zones peuvent être touchées par les tremblements de terre, par exemple la Californie (1989) et, plus récemment, l'Italie (1997). Aujourd'hui, dans la plupart des pays industrialisés, de nouvelles normes sont en cours d'élaboration ;
- ✚ **Des raisons techniques** : dans le domaine du génie civil, les ouvrages d'art construits depuis des décennies sont de plus en plus sollicités par le développement des transports de fret. Par exemple, en Europe, à partir de 1999, tous les ouvrages d'art devront être capables de supporter des camions de 40 tonnes ;
- ✚ **Des raisons climatiques** : dans tous les pays du monde, les routes et les ouvrages d'art doivent être disponibles toute l'année. Pour beaucoup de pays, cela sous-entend le dégivrage en période hivernale, par le répandage d'énormes quantités de sels qui engendrent la corrosion des aciers et la pollution des nappes phréatiques ;
- ✚ **Des raisons architecturales** : dans le domaine de la construction, les architectes sont toujours à la recherche de matériaux mécaniquement plus performants pour limiter les surfaces porteuses et donner libre cours à leur imagination dans la forme des bâtiments

IV.3.EXEMPLES DE SECTEURS D'APPLICATION DES COMPOSITES : [68]

IV.3.1. Construction aéronautique :

Les composites de haute performance ont été longtemps confinés dans l'aéronautique civile à des pièces de structure secondaire (habillage intérieur, volets), Certains obstacles à l'utilisation massive des composites sont progressivement levés. [68]

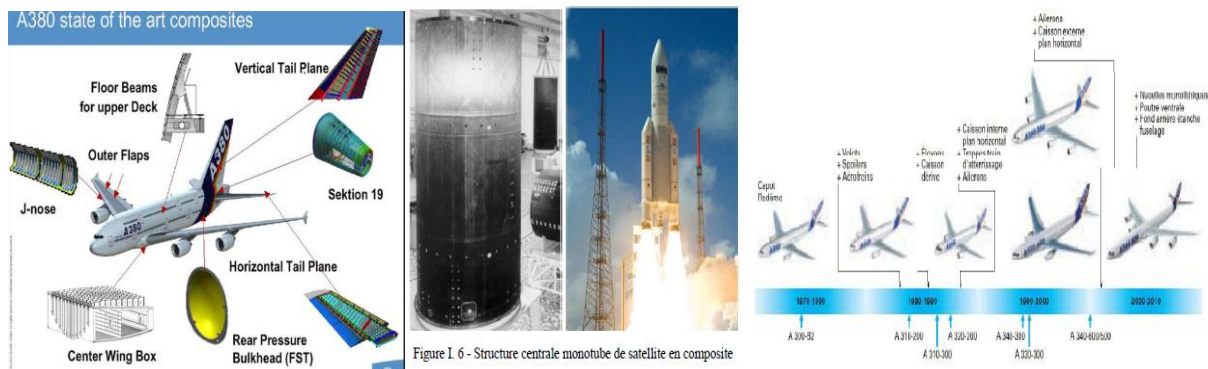


Fig. IV.2 :L'utilisation des composites dans les constructions aéronautiques [52]

IV.3.2.Construction automobile :

L'utilisation des composites dans le secteur automobile remonte à des origines relativement anciennes (fin des années 1980), mais ne s'est généralisé que très récemment, comme le montrent les décisions récentes de grands constructeurs étrangers (Volvo, Mercedes) de développer des coffres et hayons. Les composites à matrice thermoplastique sont, par contre, de plus en plus fréquents. [68]

IV.3.3. L'utilisation dans le domaine de génie civil :

Les caractéristiques de performances des matériaux composites permis aux chercheurs et concepteurs dans le monde d'adopter ces matériaux comme solution dans les cas de besoin d'augmentation de la capacité portante de plusieurs éléments, que ce soit dans le domaine d'aéronautique, spatial, automobiles et largement dans le domaine du génie civil. Ce dernier il a connu un développement important ces dernières décennies dans les projets de renforcement, réhabilitation ou de réparation des structures en béton armé. [34]



Fig. IV.3 : Renforcement d'infrastructures existantes de bâtiment, ouvrages d'art et génie civil : Poutres / poteaux / trémies / dalles / voiles [76]



Fig. IV.4 : Renforcement d'un ouvrage d'art [76]

Fig. IV.5 : TFC pour le renforcement de structures [42]

Fig. IV.6 : Renforcement d'un Bâtiment [76]

IV.3.4. Loisirs et sports : [59]

- Skis, raquettes de tennis, shaft de golf, avirons
- cannes à pêche, perches de saut
- bicyclettes, casques
- surfs, planches à voiles
- habitacle de voiture de compétition

IV.3.5. Exemples d'autres domaines d'utilisation des composites : [68]**✚ Transport ferroviaire : [59]**

- Avants de motrices
- wagons, voitures de métro
- aménagements intérieur, portes, panneaux.
- gaines de ventilation
- structures, boggies

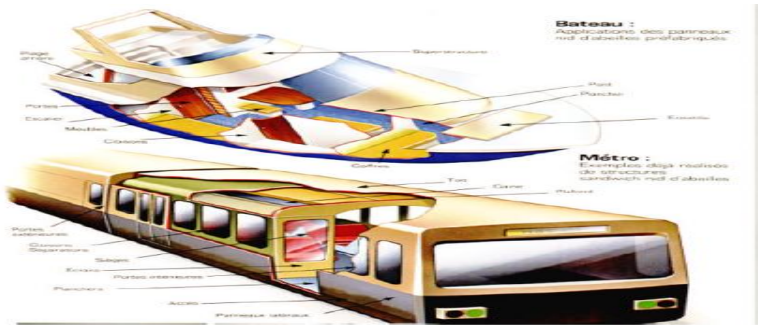


Fig. IV.7 : Utilisation des matériaux composites dans le transport [59]

- ✚ **Équipement industriel** (boîtes de stockage, isolation)
- ✚ **l'équipement électronique**, représentent déjà 26% du marché des composites à matrice organique. Le potentiel plurifonctionnel des composites (alliant par exemple étanchéité et propriétés électriques) y est important.
- ✚ **En électronique**, les boîtiers céramiques pour microprocesseurs d'Agide, récemment introduite au Nouveau Marché, sont utilisées dans le monde entier.
- ✚ **le secteur dentaire** (implants)
- ✚ **biomédical** (matériaux prothétiques)
- ✚ **la réalisation d'instruments de musique** (pianos, clavecins, violons et même accordéons)

IV.4. TECHNOLOGIES DE TRANSFORMATION :

IV.4.1. Technologies manuelles de transformation : [68]

- ✚ **moulage au contact** : est utilisé pour les composites « grandes diffusions » ; le procédé consiste à déposer sur la forme :
 - une couche de surface (gel coat) et des catalyseurs de polymérisation
 - alternativement des couches de renforts (mats ou tissus) imprégnés au rouleau d'une résine polymérisant dans des conditions proches de l'environnement ambiant de l'atelier.

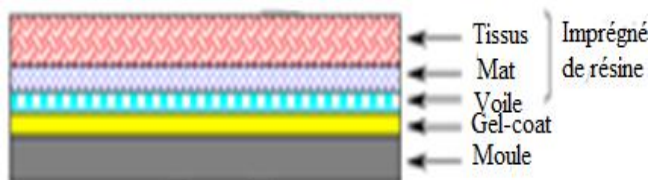


Fig. IV.8 : Principe de moulage au contact [68]

- ✚ **projection simultanée** : la résine catalysée et les fibres de renfort coupées sont projetées simultanément au moyen d'un pistolet sur une forme
- ✚ **drapage autoclave** : réservé aux composites « hautes performances », est devenu très industrialisé (en particulier en aéronautique) grâce au développement de machine à draper ; les étapes de la fabrication sont les suivantes :
 - dépose des tissus ou nappes pré imprégnés préalablement découpés à la forme voulue dans ou sur une forme par plis successifs (phase de drapage) ;
 - couverture de l'ensemble par une membrane souple et étanche et mise sous vide pour éliminer les solvants parasites ;
 - l'ensemble est porté en autoclave à haute température (>200°C) et haute pression (15 bars) pour la polymérisation (phase d'autoclavage).

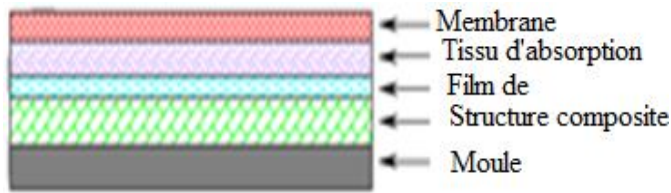


Fig. IV.9 : Principe du drapage autoclave [68]

IV.4.2. Procédés de transformation par moulage :

- Le procédé RTM
- La compression de semi-produits thermodurcissables
- Le procédé d'estampage TRE
- L'injection des thermoplastiques renforcés TPR
- Le procédé d'injection par réaction

IV.4.3. Procédé de transformation en continu :

❖ La pultrusion :

Il permet de fabriquer par une opération unique et continue le matériau composite et le produit fini sous forme de profilés longs. Le renfort filamentaire est imprégné de résine puis formé par traction à travers une filière chauffée qui assure la polymérisation. Les cadences de production sont de l'ordre du mètre de profilé par minute. La pultrusion utilise :

- des résines polyesters (GD) ou époxy (HP) ;
- des fibres de verre (GD) ou de carbone (HP) avec des taux de renforts de 50 à 80%. [68]

Les principales applications des matériaux composites réalisés par la pultrusion concernent des profilés destinés à : [65]

- la **construction électrique** : isolant électrique ;
- la **construction civile et industrielle** : plates-formes de ponts, signalisation, échelles
- les **sports et loisirs** : cannes, clubs, perches

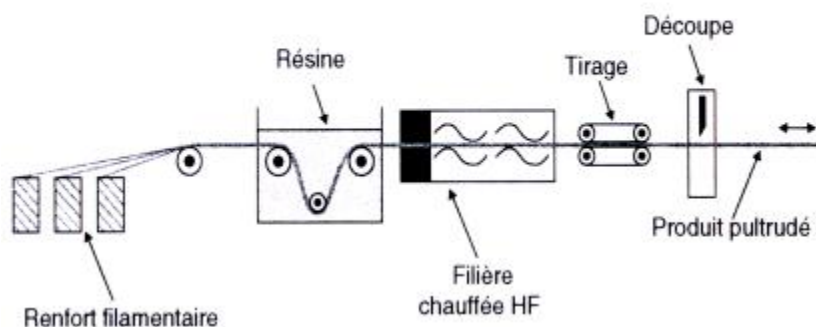


Fig. IV.10 : principe de La pultrusion [65]

Le procédé permet de produire simultanément et d'une manière continue le matériau composite et les produits finis sous formes de plaques ; le cycle de fabrication est de l'ordre de 6 à 12 mètres/minute. Les étapes de mise en œuvre du procédé sont les suivantes :

- les renforts (mats de fibres de verre coupées) et la résine polyester sont mélangées par absorption et pression mécanique sur un rouleau transfert ;
- la polymérisation a lieu dans une étuve entre 60°C et 80°C.

IV.4.4. Procédés de fabrication des formes de révolution :

a). La transformation par centrifugation :

Les composites transformés par centrifugation ont des propriétés mécaniques moyennes :

- la résine polyester et le renfort, sous forme de fibres de verre coupées, sont introduits successivement dans un moule métallique cylindrique tournant
- la résine imprègne le renfort sous l'effet de la force centrifugeuse et forme, après polymérisation, une structure de révolution. [65]

b). L'enroulement filamentaire :

Le procédé d'enroulement filamentaire est adapté à la production en petite série de corps creux de révolution. Le temps de cycle peut atteindre quelques jours en fonction du volume et de la complexité des formes ; il est utilisé avec : des matrices époxy ou polyester ; des fibres continues de verre standard ou à haut module et les fibres de carbone ;

Ce procédé est adapté à la production de *petites séries de corps creux de révolution dans* :

- l'aéronautique : moteur de fusée, pales d'hélicoptères, arbres de transmission
- la construction nautique : mate de bateaux
- la construction industrielle : tubes, oléoducs, citernes, silos
- la construction électrique : poteaux de distribution
- les sports et loisirs : cadres de vélos, cannes à pêche

L'enroulement filamentaire est particulièrement adapté aux composites « hautes performances » (HP) car le procédé, compatible avec des taux élevés de renfort, permet une orientation précise des fibres. [65]

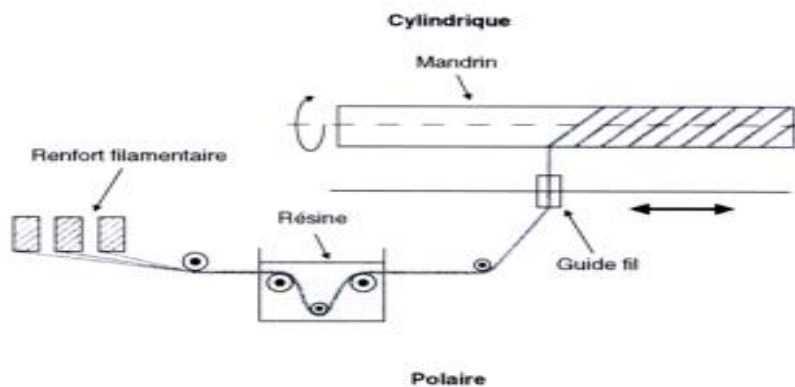


Fig. IV.11 : Principe de l'enroulement filamentaire [65]

IV.4.5. Procédés innovants :

Les procédés de transformation innovants concernent essentiellement la mise en œuvre des composites thermoplastiques ou des améliorations apportées au procédé RTM.

1. La technologie d'injection pour grande série (Large Injection Moulding Technology)
2. RocTool [68]

IV.4.6. Répartition des procédés de transformation :

On constate de fortes disparités géographiques concernant l'utilisation des procédés de transformation. L'ensemble des informations, (en pourcentage) est indiqué dans les tableaux et graphiques qui suivent. [68]

Tab IV.1 : Répartition des procédés de transformation [68]

Procédés	France	Europe	Japon	Etats Unis	Brésil	Monde
Compression SMC/BMC	35%	14%	8%	10%	2%	13%
Injection TPR	25%	35%	40%	25%	45%	35%
Moulage contact & projection	18%	18%	34%	45%	43%	23%
Enroulement filamenteux	2%	10%	7%	0%	0%	5%
Pultrusion	2%	2%	1%	10%	1%	11%
Imprégnation continu	4%	3%	6%	2%	4%	4%
RTM	5%	3%	1%	3%	3%	3%
Drapage	3%	9%	1%	1%	1%	2%
RIM	3%	1%	1%	1%	0%	1%
Estampage TRE	3%	3%	1%	3%	1%	3%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%

IV.5.LES MARCHES D'APPLICATION DES COMPOSITESDANS LA CONSTRUCTION CIVILE :

IV.5.1.Aperçu du marché mondial des composites :

En volume, le marché mondial du composite croît de 5,7% en moyenne par an ; la production européenne représente 28% de ce marché.

Le graphique ci-dessous présente le marché mondial des renforts en fibres de verre1, qui s'établit à 2,5 millions de tonnes en 2000. La répartition de la production mondiale des composites à renforts de fibres de verre, qui représentent plus de 95% de la production des matériaux composites, traduit de manière assez réaliste la répartition globale des composites dans le monde. Depuis 1994, le marché mondial des composites est en croissance moyenne annuelle de 5,7%, avec des taux de croissance de 7% en Asie, 6,5% en Europe et 4,5% en Amérique du Nord. La croissance moyenne annuelle des composites thermodurcissables (TD) est de 3%, contre 9% pour les composites thermoplastiques (TP).

L'Asie (23%) et l'Europe (28%) représentent des parts de marché équivalentes, derrière l'Amérique du Nord (47%). [68]

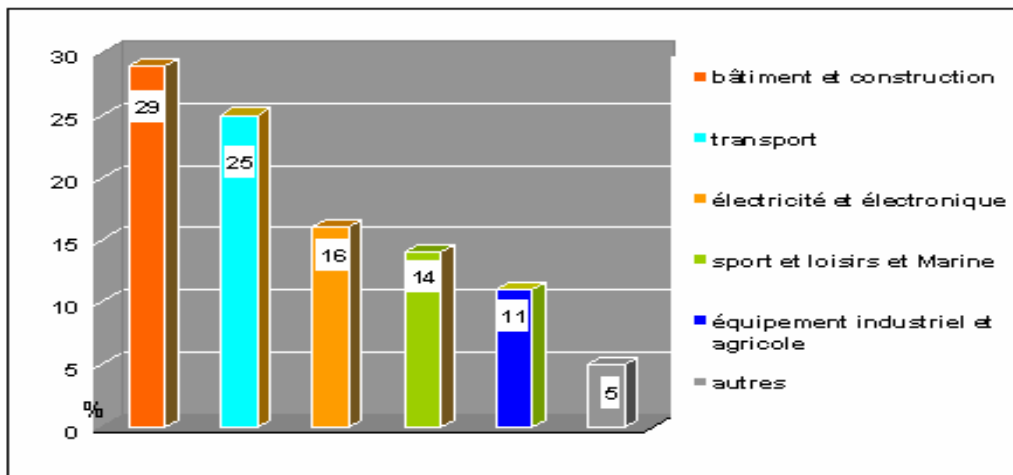


Fig. IV.12 : Un marché très diversifié pour une large gamme de produits [38]

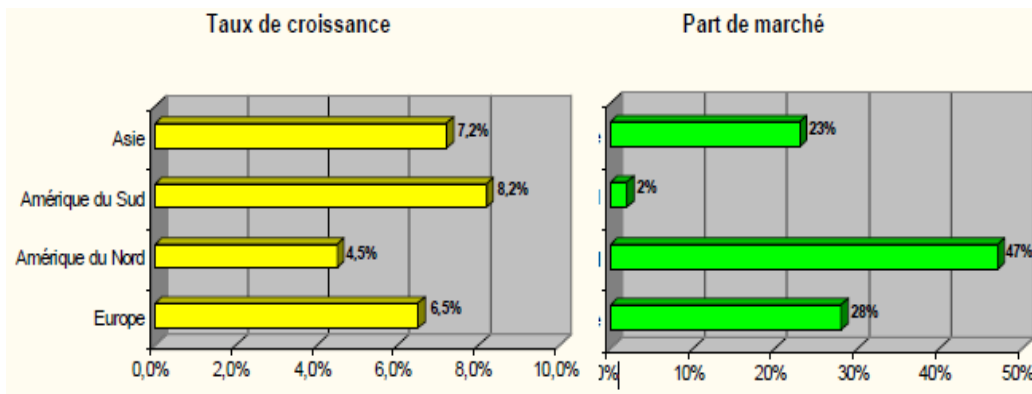


Fig. IV.13 : Marché mondial des renforts en fibres de verre [68]

IV.5.2. Répartition par marchés d'application : [68]

La consommation mondiale de composites devrait croître de 47% d'ici 2006, passant de 7 millions de tonnes en 2000, à environ 10 millions de tonnes. Les prévisions de l'évolution des marchés européens et mondiaux en volume des composites à cinq ans reposent sur des estimations de croissance annuelle propres à chaque secteur :

- 6% pour l'automobile et 5% pour l'aéronautique et les sports et loisirs
- 3% pour le matériel médical et 2% pour la construction civile
- 1% pour les autres secteurs

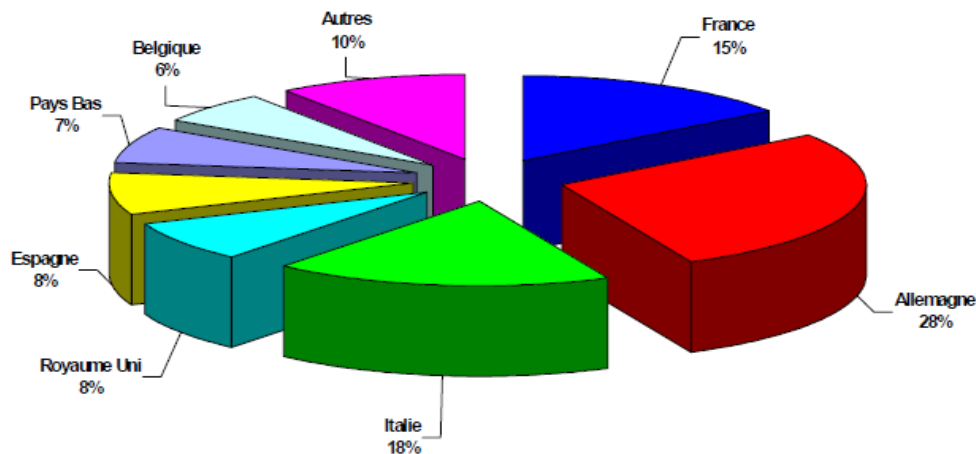


Fig. IV.14 : Parts de marché européen des renforts en fibres de verre [68]

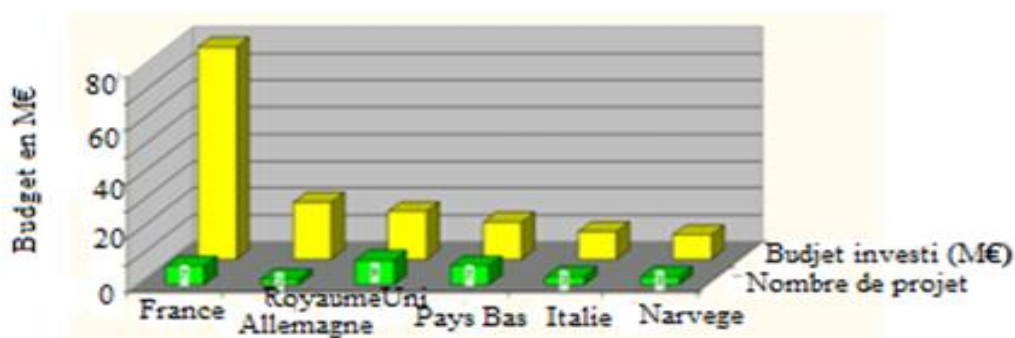


Fig. IV.15 : Budget investi en M€ et nombre de projets [68]

IV.6.CONCLUSION :

Les matériaux composites (à matrices métalliques, élastomères, polymères ou céramiques) offrent aux industriels et aux designers des possibilités nouvelles d'associer fonction, forme et matériaux, au sein de réalisations, matériaux, systèmes de plus en plus performants. Poids, anisotropie, plurifonctionnalité sont autant d'atouts de principe. Des processus nouveaux de producteurs et les utilisateurs. Les contraintes de productivité sont transmises par les donneurs d'ordre et amplifiées vers les fournisseurs. A l'occasion de chaque décision industrielle ou normative, une classe de composants ou de systèmes peut apparaître ou disparaître industriel) sont nécessaires avant de pouvoir réaliser un chiffre d'affaires significatif. Une entreprise doit pouvoir offrir à ses actionnaires et à ses partenaires financiers une rentabilité et une transparence compétitives.

Conception, d'industrialisation et de fabrication permettent d'étendre les possibilités techniques, et de mieux satisfaire des besoins parfois contradictoires (poids, fonctions...) auxquels les matériaux homogènes classiques répondent difficilement.

La compétition reste très dure entre les solutions composites et les matériaux classiques, disposant d'une avance considérable en termes d'expérience et d'investissement.

La forte valeur ajoutée de ces réalisations, leurs exigences en termes d'équipements et de compétences de haut niveau, leur confèrent un rôle croissant dans la recherche de différenciation et de compétitivité, clé du succès des industriels des économies occidentales. L'innovation apparaît comme un facteur déterminant du succès durable des entreprises, même si elle ne suffit pas à justifier auprès du consommateur une augmentation significative des prix de vente.



REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE RENFORCEMENT PAR MATERIAUX COMPOSITES

1. INTRODUCTION :

Les matériaux composites à base de fibres «PRF» ne sont utilisés pour le confinement du béton que depuis le début des années 1980, bien que l'utilisation de tubes en plastique (PVC) remplis de béton, ait débuté dès la fin des années 1970 (Kurt 1978).

Améliorer la capacité et le comportement mécanique en compression des éléments structuraux en béton armé a été toujours le souhait des ingénieurs. L'idée est séduisante et déjà fort ancienne. En 1903 réalisa des essais triaxiaux sur des cylindres de mortier de dimensions $\varnothing 80$ mm x 300 mm et démontra que l'application d'une pression de confinement latérale constante sur des cylindres de mortier pouvait augmenter sensiblement leur résistance à la compression. Il proposa alors une relation permettant de prédire la résistance en compression de mortier confiné, relation qui fut plus tard adaptée au béton par Richart et al. (1928). Ces premiers travaux ont inspiré plusieurs autres chercheurs (Balmer 1949, Chinn et Zimmerman 1965, Newman et Newman 1972). En pratique, plusieurs techniques peuvent être utilisées pour exercer cette pression de confinement sur les colonnes. On peut citer l'utilisation de tubes en acier (Gardner et Jacobson 1967), de frettes d'acier de différentes formes (Richart et al. 1929, Iyengar et al. 1972, Ahmad et Shah 1982), ou encore l'utilisation de plaques ou de lamelles en matériaux composites, collées en surface. [15]

Le but de ces essais est d'étudier le comportement des poutres en béton armé, simplement appuyées soumises à la flexion de plusieurs points, et renforcées par des matériaux composites. Nous suivrons alors l'influence du renforcement sur la capacité portante des poutres et son effet sur l'apparition et la limitation de l'ouverture des fissures. [4]

2. RESULTATS EXPERIMENTAUX :

2.1. L'UTILISATION DES NOUVEAUX MATERIAUX COMPOSITES POUR REMPLACER L'ACIER :

Dans les années soixante-dix l'utilisation des plaques d'acier collées pour le renforcement des structures en béton armé est déjà débutée. Quelques années plus tard les structures qui avaient été ainsi renforcées montrèrent une détérioration du joint acier-colle dû à un degré de corrosion important. Des projets de recherche ont alors été entrepris sur l'utilisation de nouveaux matériaux composites pour remplacer l'acier [37].

a) .Renforcement en flexion :

Ritchie et al. (1991) ont été parmi les premiers à utiliser les matériaux composites avec la méthode de renforcement par collage de plaque. Leurs essais ont consisté à tester 16 poutres en béton armé (150 mm x 300 mm x 2450 mm, $f_b = 40$ MPa, $A_s = 2$ HA10, $f_e = 400$ MPa, $s = 60$ mm), en changeant les propriétés et la nature de la plaque de composite utilisée.

La longueur du renforcement variait entre 1.7 m et 2.4 m tandis que la largeur était fixée à 150mm; l'épaisseur variait entre 1 et 8 mm. Les matériaux utilisés étaient les suivants : fibres de verre ($E_p = 11700$ à 30400 MPa, $f_{pu} = 160$ à 590 MPa); fibres de carbone ($E_p = 54500$ MPa à 118000 MPa, $f_{pu} = 590$ à 1500 MPa) et fibres d'aramide ($E_p = 72500$ MPa, $f_{pu} = 1180$ MPa). Pour 9 des poutres testées, l'arrachement du béton fut la cause de la rupture. En guise d'ancrages, les auteurs ont soit collé des cornières en L sur les faces verticales de la poutre, aux extrémités de la plaque, soit prolongé la plaque jusqu'aux appuis.

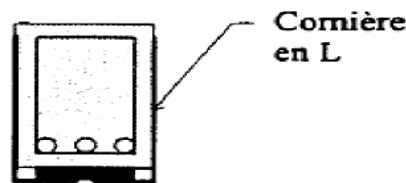


Fig. 1 : Ancrage avec cornières d'acier profilées en L [37].

Le premier type d'ancrage a empêché le déchirement du béton dans 25 % des cas tandis que le second a été efficace dans 50% des cas. Les auteurs ont ainsi suggéré de réduire la contrainte de cisaillement dans la colle qui cause le décollement plutôt que de concevoir des ancres en bout de plaque. Un moyen relativement efficace de réaliser ceci est donc de prolonger la plaque jusqu'aux appuis afin d'atténuer la discontinuité dans la rigidité de la poutre. [55]

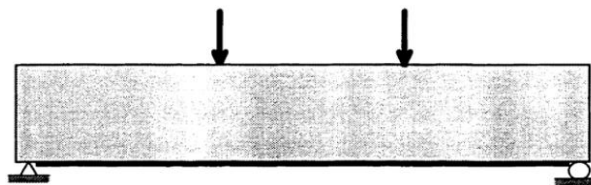


Fig.2 : Prolongement de la plaque jusqu'aux appuis [6]

Charif et al (1994) ont testé 8 poutrelles en béton armé (150 mm x 150 mm x 1180 mm ; $f_b = 37.7$ MPa ; $A_s = 2HA10$, $f_e = 450$ MPa; $s = 60$ mm) renforcées avec une plaque en fibres de verre ($f_p = 170$ MPa) ancrées de différentes façons (boulons, plaques, cornières). La plaque de composite mesurait 1000 mm de long et 100 mm de large ; son épaisseur variait entre 1 et 3 mm. La plaque et les ancres en composites étaient constitués de fibres de verre tissées. Pour les poutres avec une plaque de 2 ou 3 mm d'épaisseur, la rupture a été initiée par le décollement de la plaque à une extrémité de la poutrelle. La contrainte de cisaillement dans l'interface avait dépassé la résistance maximale de la colle. Ainsi, le décollement de la plaque n'a pas entraîné l'arrachement du béton.

Par contre, l'utilisation de boulons aux extrémités n'a pu empêcher l'arrachement du béton, même si la séparation complète de la plaque a été évitée.

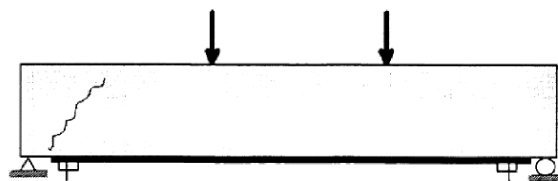


Fig.3 : Ancrage avec boulons [6].

Des plaques en composites collées aux tiers extérieurs de la portée sur les parois verticales ont provoqué l'apparition de fissures qui ont longé le contour inférieur de ces plaques, du bord

jusqu'à la charge .La rupture s'est faite par cisaillement de la poutre. Les auteurs n'ont pas tenu compte dans leur programme expérimental de paramètres supplémentaires tels l'orientation des fibres qui composent les ancrages ou la plaque de renforcement.

Enfin, une poutre renforcée d'une plaque en composites et faite d'une seule pièce découpée en forme de I (avant son collage sur la poutre) a fait l'objet d'un chargement. La rupture classique en flexion s'est produite et l'ensemble a démontré une excellente ductilité. [6]

Djelal et al (1998) ont été orientés vers le renforcement à l'aide de deux lamelles de fibre de carbone sur un ou deux lits. Le programme expérimental est décrit comme suit : huit poutres de section rectangulaires ont été réalisées pour cette étude expérimentale. Toutes les poutres sont identiques, ont une section de $15 \times 30 \text{ cm}^2$ et une longueur de 3 m, elles sont armées de deux barres HA14 à la fibre tendue et 2HA8 à la fibre supérieure, l'acier est de nuance E500, $f_b = 35 \text{ MPa}$. Les poutres ont été testées en flexion quatre points, la mesure de la charge est réalisée à l'aide d'un capteur de force d'une capacité de 500 kN en statique. [19]

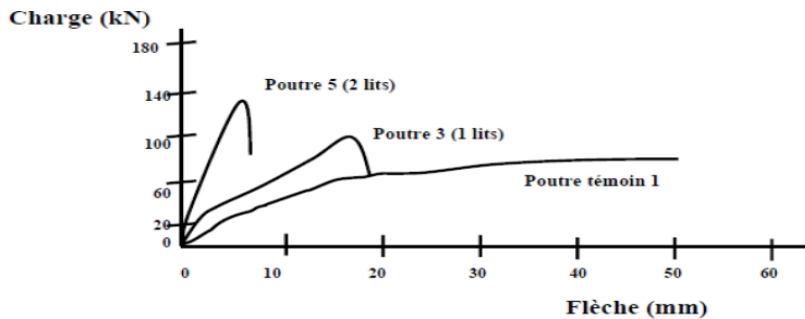


Fig.4 : Influence du nombre de lits de lamelle [19].

M.Abdessamed et S. Kenai (2003) ont contribué à l'introduction de la technique de renforcement par matériaux composites en Algérie par une investigation expérimentale sur neuf poutres de dimensions réduites en béton armé. Les poutres ont une longueur de 170 cm, et 110 cm de portée et de section $16 \times 18 \text{ cm}^2$. Les armatures sont de trois barres d'acier HA12 dans la partie tendue et de deux barres HA10 dans la partie comprimée, tandis que les cadres sont des aciers doux lisse de diamètre 8 mm, espacés de 20 cm. Ces spécimens d'essai se distinguent essentiellement par le type du composite collé et les manières et les localisations du collage appliqué. Les deux premières sont des poutres test, elles ne sont pas renforcées, les sept autres sont réparties en deux catégories. La première est celle des poutres renforcées avant chargement par collage de trois composites différents : TFC Freyssinet, Sika Carbodur lamelle et Sika Wrap alors que la deuxième catégorie est celle de quatre poutres réparées par injection et placage des composites après le chargement et l'apparition des fissures.

Ils ont obtenu d'importants résultats notamment en termes de gain de capacité portante, de réduction d'apparition et d'ouverture de fissures ainsi que les flèches.

La comparaison entre les résultats analytiques et expérimentaux montre que le gain théorique en charge de service et de rupture est nettement supérieur au gain mesuré. Cependant, il faut noter que le calcul théorique ainsi que l'étude expérimentale confirment l'effet bénéfique du renforcement des poutres fissurées et le gain appréciable dans la capacité portante [23].

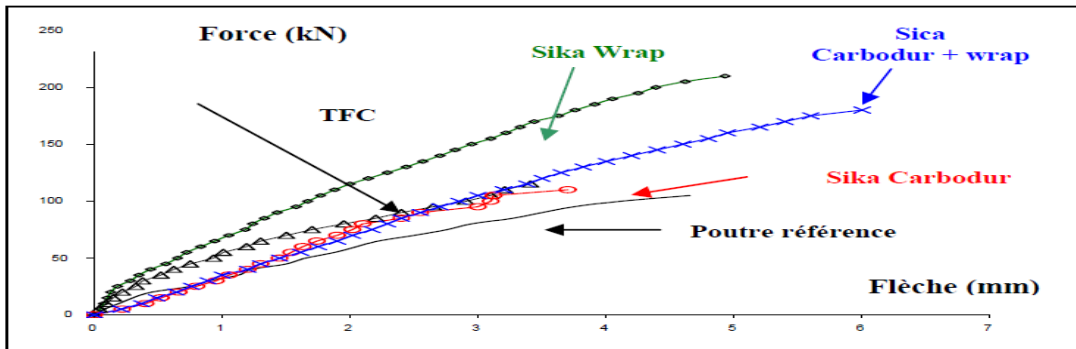


Fig.5 : Courbes force-flèche des différents types de renforcements [1]

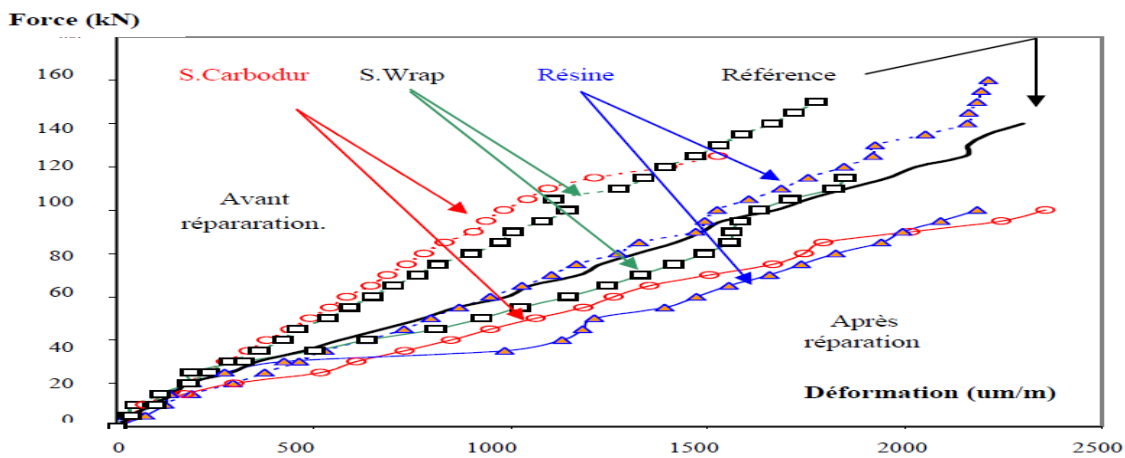


Fig.6 : Courbes force-déformation des aciers pour poutres réparées et renforcées [1]

A. AICHAOUI en **2006** a réalisé des essais expérimentaux en étudiant le comportement des poutres en béton armé, simplement appuyées et soumises à la flexion en quatre points, elles sont renforcées par des matériaux composites (SIKACARBODUR et SIKAWRAP) afin de déterminer la méthode efficace du renforcement. Les essais portent sur dix poutres de section rectangulaire soumises à un chargement concentré symétrique (chargement en flexion quatre points). Les caractéristiques géométriques des poutres ont été établies en fonction des dimensions du coffrage métallique disponible au niveau du laboratoire Génie Civil de l'ENP. D'autre part il a maintenu les mêmes dimensions que celles des spécimens de Mr ABDESSEMED pour comparer les résultats expérimentaux.

Les poutres ont les dimensions suivantes : une longueur totale de 170 cm avec une longueur entre nus d'appuis de 150 cm, et la section transversale est de (16*18 cm²). La figure 1.22 donne une illustration du schéma statique équivalent des poutres d'essai.

Les poutres ont été renforcées, de différentes manières, par des matériaux composites (les caractéristiques du béton et des matériaux composites seront présentées avec détails dans le chapitre d'études numériques). Une comparaison des résultats obtenus a été faite pour chaque mode de renforcement. [55][4]



Fig.7 : Mode de renforcement [4]

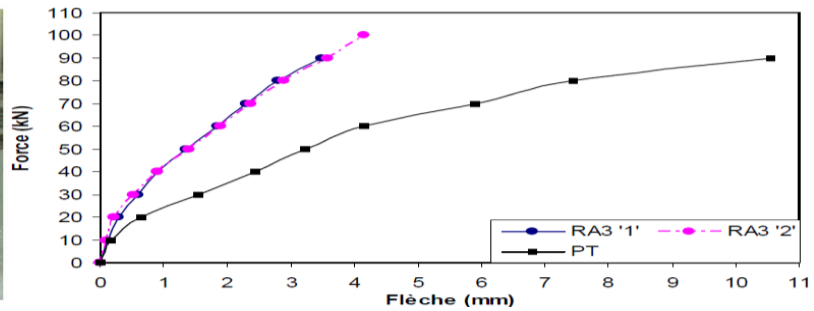


Fig.8 : Courbes force-flèche à mi-travée des poutres renforcées. [4]

b) .Renforcement au cisaillement :

Plusieurs recherches traitent le comportement des poutres renforcées à l'aide de plaques en matériaux composites ont été récemment entreprises. Mais il s'agit dans la grande majorité des cas de renforcement en flexion et peu de données sont disponibles sur la faisabilité du renforcement au cisaillement [78].

Saadatmanesh et Ehsani (1991) ont entrepris un travail qui consistait à renforcer une poutre de béton sans armatures à l'aide d'une plaque de composite en fibres de verre. La poutre était alors chargée aux tiers de sa portée. A cause de l'absence d'armatures longitudinales, une fissure importante s'est développée à la face tendue et a entraîné le décollement de la plaque. Les auteurs ont suggéré d'inclure une certaine quantité d'armatures pour limiter l'ouverture des fissures et empêcher le décollement [25].

Meier et Kaiser (1991) ont identifié deux types de délaminage lors de leurs essais. Le premier a été nommé peeling-off ou décollement rapide de la plaque de renforcement dû à l'ouverture d'une fissure de cisaillement et fut observé sur les poutres avec un fort pourcentage d'acier et de composites. Il était initié sous une des charges concentrées et se propageait vers l'appui le plus rapproché. Le second type de délaminage était un décollement progressif dû à une surface de béton non parfaitement plane et fut surtout observé sur des poutres renforcées de plaques minces [55].

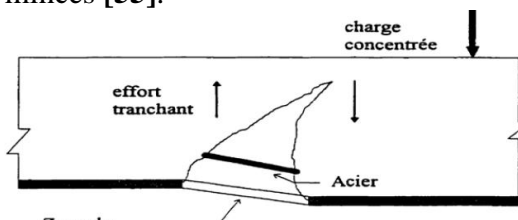


Fig.9 : Décollement de type peeling-off [4]

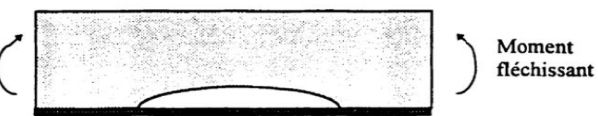


Fig.10 : Décollement dû à une surface concave [4]

2.2. CONTRIBUTION DES BANDES DE TFC A LA RESISTANCE A L'EFFORT TRANCHANT DE POUTRE EN BA :

Merdas Abdelghani (2005) : a réalisé des études de renforcement à l'effort tranchant de poutres en béton armé par collage de bandes de TFC (Cheikhna et al. 2003). Les bandes sont orientées verticalement pour le premier groupe de poutres et inclinées à 45° par rapport à l'axe horizontal de la poutre pour le deuxième groupe. Dans chaque cas, on a un renforcement par collage de tissu en forme de U et un renforcement par bandage.

Pour cette étude, dix poutres en béton armé identiques ont été réalisées. Les deux premières sont des poutres de référence, elles ne sont pas renforcées. Les huit autres poutres sont

renforcées de différentes façons par collage de bandes de TFC. Les renforcements sont réalisés de telle sorte que la rupture par cisaillement soit prédominante.

Les poutres ont 1800 mm de portée et 130 x 450 mm² de section. Elles sont armées par deux barres d'acier HA16 et deux barres HA14 dans la partie tendue et par deux barres HA 8 dans la partie comprimée de la poutre. Pour les aciers verticaux, on a utilisé un acier doux lisse de diamètre 6 mm, ils sont espacés de 300 mm (Figure 9). Pour toutes les poutres renforcées, la largeur et l'épaisseur des bandes sont respectivement égales à 40 et 0,43 mm. [65]

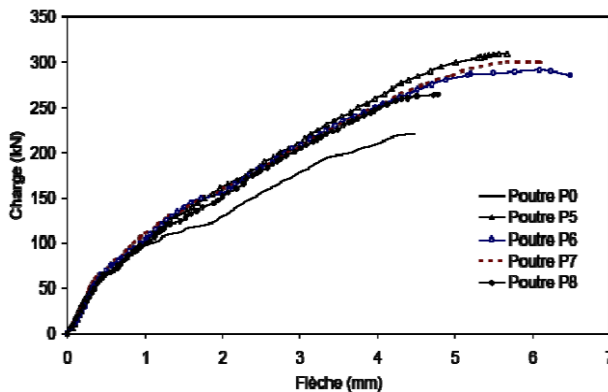


Fig.11 : Comportement global de la poutre de référence et les poutres renforcées par collage de bandes inclinées. [65]

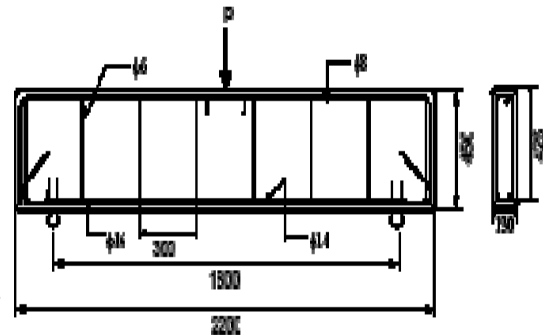


Fig.12 : Modèle expérimental [65]

Pierre-Alexandre BRIEMEL (2013) : La dernière étape de l'étude consiste en une analyse expérimentale du comportement de poutres en béton armé renforcées. Elle va être menée en effectuant des essais de flexion sur des poutres non renforcées et renforcées avec des fibres de carbone et végétales.

La première étape de préparation des renforts a été la découpe de plaques de fibres à la taille des moules. En calculant le ratio du volume de fibres par rapport au volume de résine souhaité nous avons déterminé le nombre de couches de fibres à mettre en œuvre et la quantité de résine à appliquer.

Des essais de flexion simple ont été effectués sur les poutres en béton armé.

Les essais ont été effectués sur 9 poutres.

- 3 non pas été renforcées
- 3 ont été renforcées par des fibres de carbone : SIKA CARBODUR® S 512, ce sont des fibres de carbone dans une matrice époxyde [18]



Fig.13 : renfort en carbone décollé après un essai de flexion [18]



Fig.14 : une poutre dont le renfort en fibres de carbone s'est décollé [18]



Fig.15 : Renfort composé de fibres ayant rompu lors d'un essai de flexion [18]

Lors des essais deux paramètres ont été enregistrés. Le chargement appliqué aux poutres et la flèche de celles-ci. Les résultats ci-dessous ont été enregistrés.

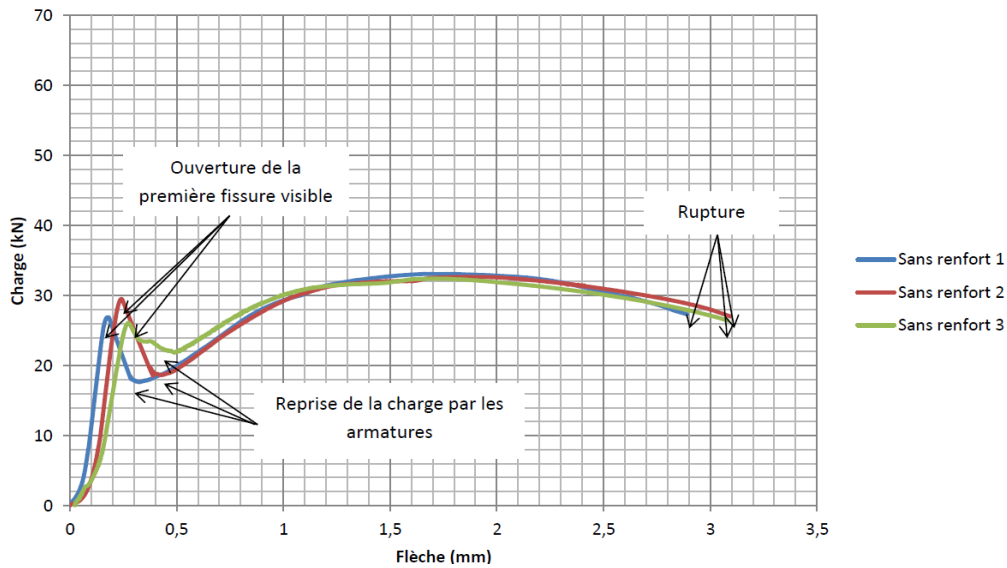


Fig.16 : Résultats des essais sur les poutres sans renfort [18]

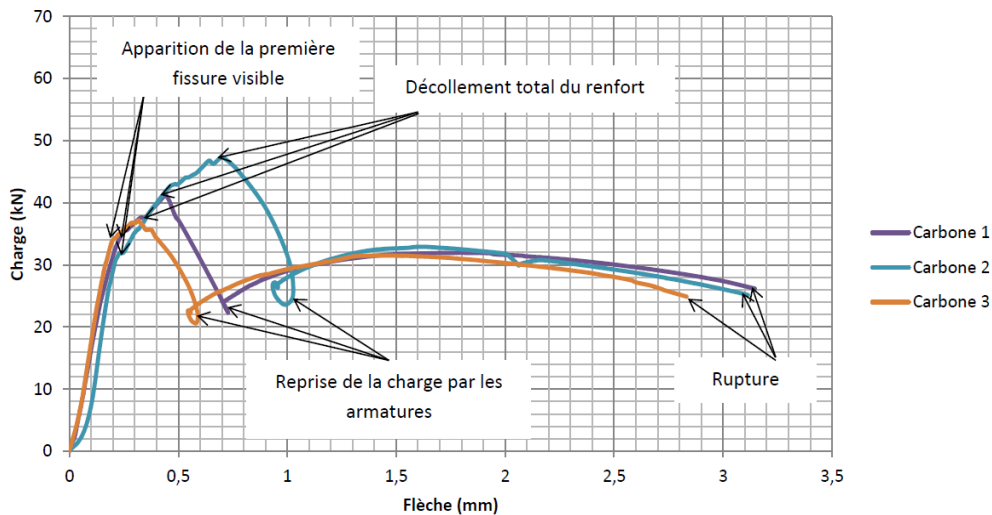


Fig.17 : Résultats des essais sur les poutres avec des renforts en fibres de carbone [18]

3.RESULTATS NUMERIQUES :

❖ Études statiques :

Plusieurs études numériques statiques ont été effectuées sur des poutres en béton armé :

- **François Buyle-Bodin, Emmanuelle David et Eric Ragneau (EUDIL-USTL « Villeneuve d'Ascq » et INSA-LMA2G « Rennes » en 2002)** ont travaillé sur la flexion des poutres en béton armé renforcé par les fibres de carbone. Ils ont proposés une étude numérique non-linéaire (comportement élasto-plastique) pour compléter le travail expérimentale. Le logiciel CASTEM 2000 a été utilisé pour le model élément fini pour simuler le comportement de la poutre, cette dernière a été modélisée en élément plaque en contraintes planes. Expérimentalement la poutre possède les dimensions suivantes (3000 x 150 x 300 mm³) et des armatures de 14 mm de diamètre. Il a été conclu en comparaison avec les tests expérimentaux que l'analyse non-linéaire peut prédire correctement le comportement de la

poutre en béton armé renforcée, mais aussi l'étude expérimentale indique que les fibres de carbone peuvent être utilisées efficacement pour réparer les poutres.

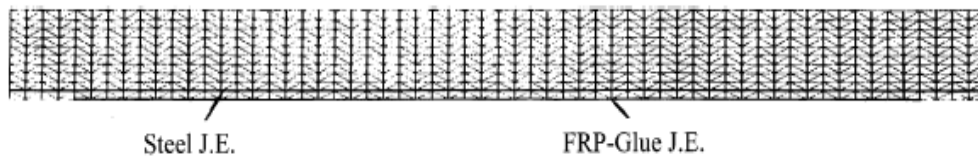


Fig.18 : Modèle en éléments finis (CASTEM2000) adopté



Fig.19 : Cas de chargement dans modèle expérimental

- **R.Santhakuma, E.Chandrasekaran et R.Dhanaraj (Dept. of Civil Engg, Dept.of Aeronautical Engg Anna University « Inde » en.2004)** ont simulé le comportement de poutres renforcées en utilisant les fibres de carbone avec une orientation des fibres à 45° et à 90 ° en utilisant le logiciel de calcul en éléments finis ANSYS et ont étudié le comportement des poutres non fissurée et fissurée. La modélisation s'est faite en adoptant des éléments de la bibliothèque du logiciel :
 - SOLID 65 a été utilisé pour modéliser le béton
 - LINK 8 représentant le ferrailage
 - SOLID 45 représentant la plaque d'acier supportant les charges
 - SOLID 46 représentant le renforcement par matériau composite

Dans le cas de l'étude de la poutre pré fissurée il est d'usage de la renforcer après apparitions des fissures mais pour ce travail les chercheurs ont réduit la difficulté en modélisant une poutre renforcée avant fissuration en associant à l'élément SOLID 46 (couche de fibre de carbone) les propriétés du béton, en supposant que les fibres n'auront aucun effet sur la poutre non-fissurée, cette dernière sera surchargée jusqu'à fissuration du béton. Après fissuration les propriétés des fibres de carbones seront remises à jour.

En conclusion, les résultats trouvés par les chercheurs concordent avec les résultats d'études expérimentales et que le comportement de la poutre n'est pas le même fissurée et non fissurée. L'étude numérique a permis de suivre l'évolution des fissures, car celles-ci ne sont pas visibles (en expérimentation) à cause des renforcements.

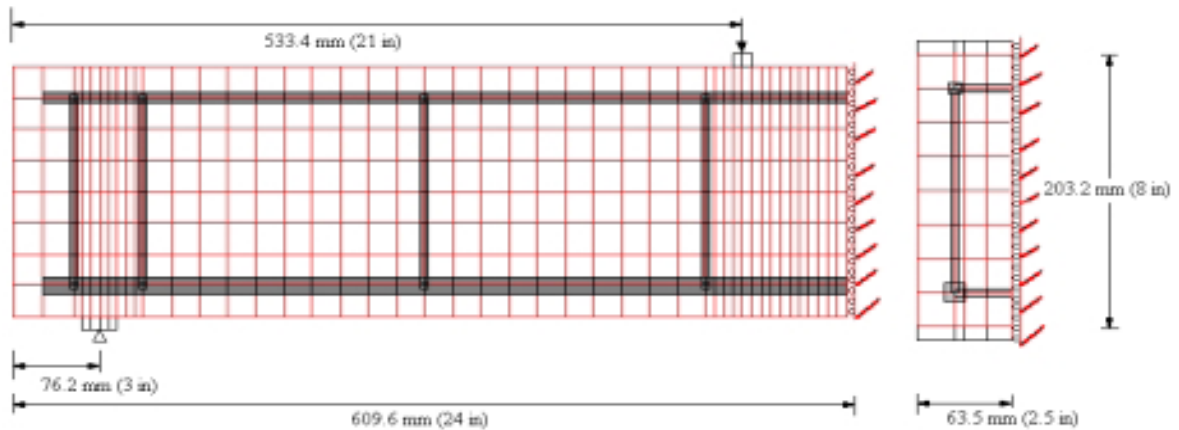


Fig.20 : Détails de la modélisation effectuée avec ANSYS

Fabrice Conus et René Suter (Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg « Suisse » en 2004) ont travaillé sur le renforcement des poutres renforcées par tissu d'aramide où les chercheurs ont présenté le résultat d'une modélisation d'une poutre (en 2D) renforcée à l'aide du logiciel ADINA (Automatic Dynamic Incremental Non linear Analysis). Le but de l'étude consistait à déterminer l'augmentation de la capacité portante et de la déformabilité des poutres renforcées en fonction du nombre de couches d'aramide appliquées. Ces deux caractéristiques (la capacité portante et la déformabilité), permettent d'évaluer la faculté d'une pile de pont à absorber l'énergie cinétique produite par l'impact d'un véhicule lourd roulant à grande vitesse. La première partie de l'étude consistait à recueillir les résultats de poutres renforcées par tissu d'aramide appliqués en différentes couches dans les directions longitudinale et transversale. Par la suite une modélisation numérique en 2D a été effectuée à l'aide du logiciel d'éléments finis ADINA, le modèle est composé de 24 éléments plans à 8 nœuds représentant le béton, 18 éléments de barre à 3 nœuds représentant l'acier d'armature et 6 éléments de barre représentant le tissu d'aramide. Leurs dispositions sont illustrées dans la figure suivante :

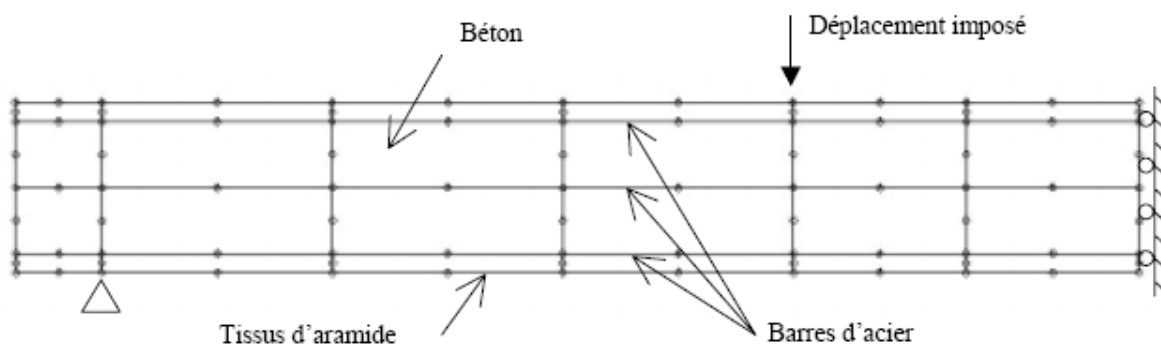


Fig.21 : Disposition des différents éléments constituant la poutre et les différents renforcements

En conclusion les chercheurs ont constaté que :

- La charge de ruine augmente considérablement, jusqu'à plus de 150% pour un renforcement à l'aide de 4 couches de tissus longitudinaux ;
- La déformabilité augmente également significativement (jusqu'à près de 75%) ;

- Un modèle numérique simple permet de simuler fidèlement le comportement global des éléments renforcés pour des charges de services ;
- Ce modèle numérique ne permet par contre pas de prédire une charge de ruine de manière fiable à ce moment-là. Le calcul s'arrête bien en deçà des valeurs réelles de rupture.

Ces constatations démontrent que ce système de renforcement est très efficace, tant au niveau de la performance que de la rapidité de mise en œuvre, et que d'un point de vue économique il sera concurrentiel face aux méthodes traditionnelles de renforcement, de plus la modélisation bidimensionnelle donne pleine satisfaction pour ce qui est de la simulation du comportement en flexion des éléments sous charges de service.

Adrian K.Y. Hii, Riadh Al-Mahaidi (Department of Civil Engineering, Monash « Australie » en 2006) ont procédé à une étude expérimentale et numérique d'une poutre en béton armé avec une section en boîte renforcée suivant la torsion avec des lamelles en fibres de carbone. En premier lieu le travail expérimental s'est fait sur une poutre à section évidée (section en boîte) et une autre à section pleine. En deuxième lieu l'étude a porté sur une modélisation en éléments finis non linéaire. Les poutres étudiées avaient une section de 500 x 350 mm et une longueur de 2500 mm

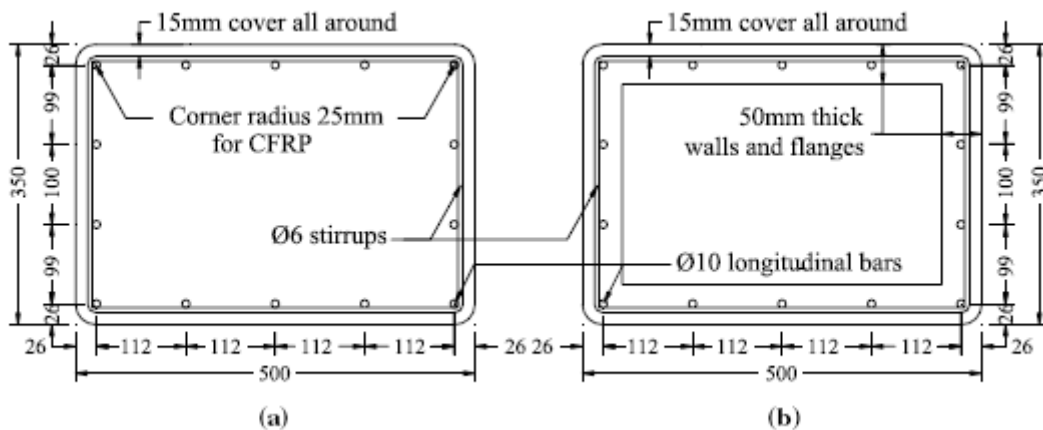


Fig.22 : Disposition des armatures de a) Poutre à section pleine, b) poutre à section évidée

Dans la partie numérique le logiciel **DIANA** a été utilisé pour modéliser ces poutres où le béton a été représenté par un élément iso paramétrique à 20 nœuds et les lamelles en fibre de carbone par un élément iso paramétrique quadrilatéral à 8 nœuds. Le levier a été modélisé par un élément plaque iso paramétrique quadrilatéral à 8 nœuds et les bars du ferrailage ont été modélisées individuellement liées aux nœuds de la poutre.

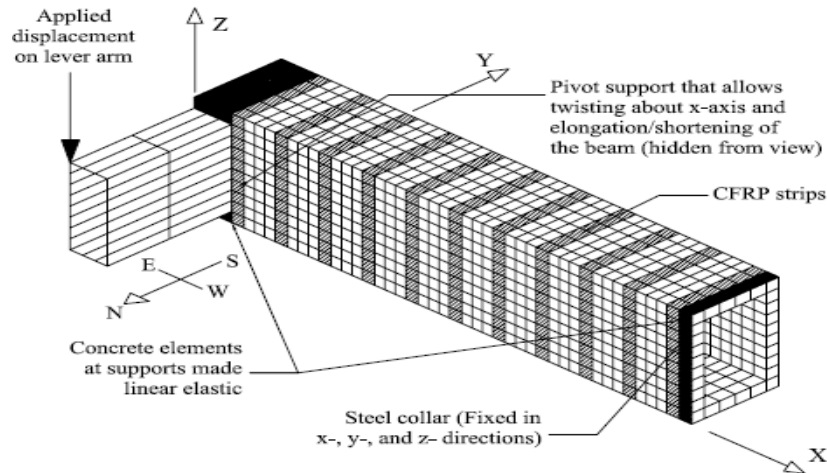


Fig.23 : Conditions aux limites du modèle éléments finis

Les conclusions faites ont été les suivantes : le renforcement par fibres de carbone s'est avéré être une bonne solution pour les problèmes liés à la torsion des poutres à section évidée et à section pleine, augmentant dans les deux cas les fissurations et la force de portance respectivement de 40 % et 78 %. Les déformations mesurées informent que la distribution des contraintes n'est pas uniforme entre et à travers les fibres de carbone, cette variation a été attribuée à la non ductilité des lamelles et à l'action de la torsion sur le béton. Le travail numérique a été utilisé en considérant un modèle non linéaire. Les résultats concordent avec ceux de l'expérimentation en termes de comportement par rapport à la torsion et la réponse des aciers, des fibres et l'avènement des fissures.

I. Elyasian, N. Abdoli et H.R. Ronagh (Department of Civil Engineering, the University of Yazd, Yazd « Iran », Department of Civil Engineering, the University of Queensland, Brisbane « Australie » en 2006) ont évalué des paramètres effectifs sur une poutre en béton armé renforcée par fibres de carbone suivant la cisaillement en utilisant un modèle éléments finis. Le modèle numérique a été réalisé sur logiciel ANSYS, la poutre modélisée possède les dimensions suivantes 2,13 m de longueur 38 cm de hauteur et 23 cm de largeur. Le ferrailage inclut deux barres de 9 mm de diamètre pour la partie comprimée et deux barres de 25 mm dans la partie tendue et des étriers de 9 mm de diamètre.

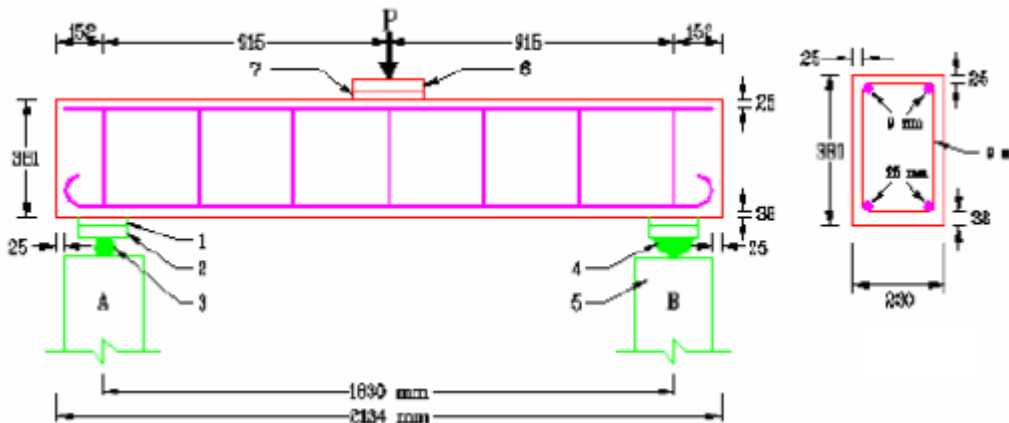


Fig.24 : Dimensions de la poutre et dispositions des renforcements

Le béton, le ferrailage, les fibres de carbone et les plaques en acier ont été modélisés par les éléments SOLID 65, LINK 8, SHELL 43 et SOLID 45. Le maillage de la poutre est exposé dans la figure suivante :

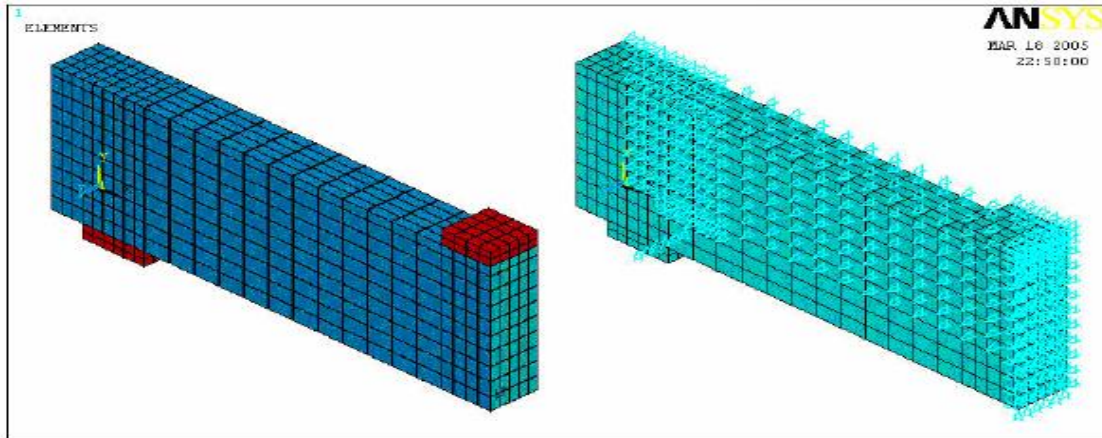


Fig.25 : Géométrie du modèle sur ANSYS, considérant la symétrie

Les paramètres effectifs qui ont été évalués sont : l'effet de l'orientation des fibres, l'effet de la contrainte de compression du béton, effet de la contrainte de traction longitudinale du ferrailage, l'effet de la contrainte de compression du ferrailage et en fin l'effet des étriers. En conclusion, les résultats des travaux entrepris indiquent que le logiciel ANSYS a été capable de donner des résultats satisfaisants dont la position de l'alignement à 90° des fibres de carbone aide à gagner en portance, par contre l'alignement à 0° aide à mieux contrôler la propagation des fissures.

4. CONCLUSION :

Les fibres de carbone avec les avantages présentés précédemment, présentent la solution adéquate pour les travaux de réhabilitation et de réparation des structures en béton armé. Leur utilisation dans le domaine du génie civil a connu un développement important ces dernières années, cette utilisation a permis aux chercheurs d'étudier d'une manière profonde le comportement, les limites d'utilisation et l'efficacité de ce renfort.

Les méthodes de l'utilisation de type de renfort dans le génie-civil résident essentiellement sur des observations structurelles ainsi que sur l'expérience de l'ingénieur et leur distribution sur les zones endommagées restent, plutôt, aléatoire. Pour une distribution optimisée, une méthode de dimensionnement rigoureuse s'impose, c'est dans cette optique que consiste la suite de notre travail.

L'analyse numérique des poutres de façon particulière et des ouvrages d'art doit être précédée par une série collecte d'informations, où le but est de rassembler toutes les caractéristiques des matériaux utilisés pour les introduire dans les logiciels de calcul.

Cette recherche bibliographique nous a porté beaucoup d'information sur les différents travaux expérimentaux antérieurs et qui est une source d'aide pour les futures recherches.

CHAPITRE V :

COMPORTEMENT

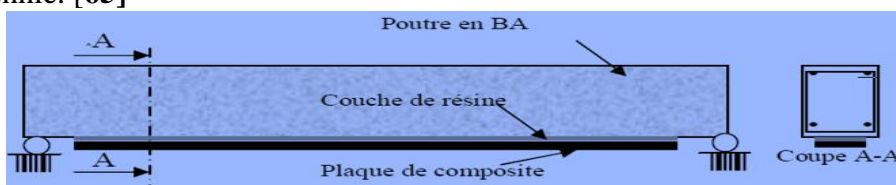
DES POUTRES

ENBETON ARME

V. COMPORTEMENT DES POUTRES EN BETON ARME

V.1. INTRODUCTION :

Les méthodes traditionnelles qui sont généralement employées pour le renforcement des poutres en béton armé soumises à la flexion sont la post-tension externe et le collage de plaques en acier. Leurs inconvénients s'étendant de la difficulté d'application au manque de durabilité. Ces dernières années, le collage de plaques ou de feuillets de polymère renforcés de fibres (PRF), tel que le TFC, est devenu une méthode très populaire pour le renforcement des poutres en béton armé soumises à la flexion. En fait, l'application des composites pour le renforcement des structures s'est effectué pour la première fois au milieu des années 1980 pour le renforcement des poutres en béton armé soumises à la flexion à l'aide de PRF au Laboratoire Fédéral Suisse pour l'essai des matériaux et la recherche (Meier *et al.* 1993). Une poutre en BA avec une plaque de carbone collée est indiquée sur la Figure (FigV.1). La plupart des recherches existantes sur le collage de PRF pour le renforcement en flexion ont été effectuées dans la dernière décennie. [65]



FigV.1 : Plaque de composite collée sur une poutre en béton armé [65]

V.2.COMPORTEMENT GLOBAL D'UNE POUTRE EN BA :

Le comportement global d'une poutre en béton armé est divisé en 3 phases principales, qu'elle soit renforcée par le collage du matériau composite ou non.

Les essais sur pièces fléchies sont généralement réalisés en appliquant à des poutres reposant sur deux appuis simples des systèmes de charges concentrées égales et symétriquement disposées; le plus souvent on dispose de deux charges égales et symétriques.

Tab V.1 : Présentation des sollicitations dans les 3 types de poutres [18]

	Poutre appuyée simplement	Poutre encastrée	Poutre en console
Schéma de l'élément			
Diagramme des moments			
Valeur des moments maximums	$M_0 = \frac{p * l^2}{8}$	$M_A = \frac{-p * l^2}{24}$ $M_0 = \frac{p * l^2}{12}$	$M_A = \frac{-p * l^2}{2}$

Dans la partie comprise entre les deux charges, la poutre est soumise à un moment de flexion constant $M = P * a$ et un effort tranchant V nul (solicitation de flexion quatre points). Dans les sections comprises entre les points d'application des charges et les appuis, l'effort tranchant est constant $V = \pm P$ [17].

V.3.MECANISMES DE RUPTURE D'UNE POUTRE EN BETON ARME :

Le comportement global, d'une poutre en béton armé soumise à un essai de flexion trois points ou quatre points est composé de 3 phases.

La **1re phase** linéaire correspond au comportement élastique de service des poutres non fissurées.

La **2ème phase** linéaire correspond au comportement de service mais lorsque la poutre est fissurée. Pendant cette phase, il n'existe pas de différence notable du développement de la fissuration initiale que la poutre ait été endommagée par cisaillement ou par flexion. De toutes les façons, la fissuration commence avec l'apparition de fissures due à la flexion dans la partie inférieure centrale de la poutre. Ensuite, ces premières **fissures dites de flexion** se propagent vers le haut de la poutre. Les fissures dans les zones de cisaillement élevé se propagent par à la contrainte principale oblique. Ces dernières fissures sont appelées **fissures de cisaillement par flexion** [28]

La principale différence, entre l'endommagement par cisaillement et celui par flexion, se constate à la rupture de la poutre : **3ème phase** du comportement.

Deux mécanismes principaux de rupture existent : rupture par flexion (F) ou rupture par cisaillement.

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. La rupture par cisaillement est due soit à :

- ❖ la contrainte principale oblique (CO)
- ❖ la compression par cisaillement (CC)
- ❖ l'adhérence par cisaillement (AC). Ces quatre mécanismes de rupture sont présentés dans les paragraphes suivants.

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 empêchée 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. [55]

V.4. CLASSIFICATION DES MODES DE RUPTURE :

Un certain nombre de modes de rupture a été observé pour des poutres en BA collées avec des PRF en soffite dans de nombreuses études expérimentales déjà réalisées 1 (par exemple Ritchie et al. 1991, Saadatmanesh et Ehsani 1991, Triantaflybu et Plevris 1992, Sharif et al. 1994, Takeda et al. 1996, Arduini et Nanni 1997, Jardin et al. 1997, 1998, Grace et al. 1998, Ross et al. 1999, Bonacci et Maleej 2000, Rahimi et Hutchinson 2001)

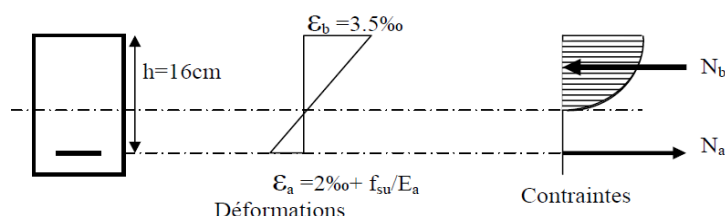
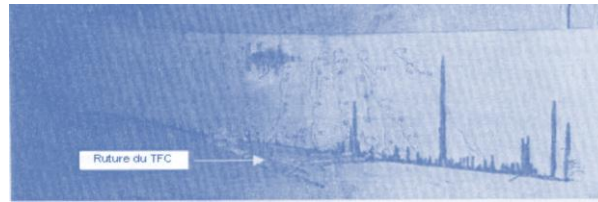


Fig.V.2 : Distribution à la rupture des déformations et contraintes [4]

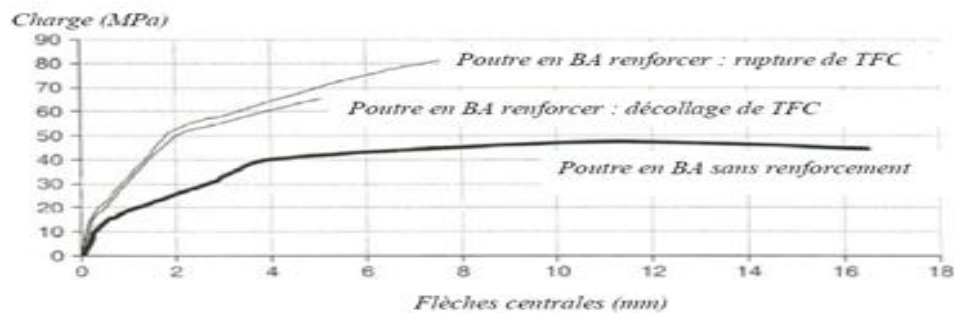
V.4.1.Rupture flexionnelle :

Si les deux extrémités de la plaque du composite sont correctement ancrées, la capacité flexionnelle ultime de la poutre est atteinte lorsque soit la plaque de PRF se rompt par rupture due à la traction, soit le béton en compression s'écrase.



FigV.3 : Poutre en BA renforcée - Rupture de PRF [65]

Cela est très similaire à la rupture flexionnelle classique des poutres en BA, à l'exception de petites différences dues à la fragilité de la plaque collée de PRF. La rupture de cette dernière se produit généralement après plastification des barres d'acier longitudinales. La Figure (FigV.4) illustre le diagramme charge-flèche à mi-portée d'une poutre en BA simplement appuyée, renforcée par des PRF et soumise à la flexion de quatre points. Pour cette poutre particulière, la plaque est terminée très près de l'appui et aucun décollement prématuré ne s'est produit. Au lieu de cela, la poutre s'est rompue en flexion par la rupture du PRF. Comparée avec la réponse correspondante à la poutre de contrôle en BA non renforcée, la poutre plaquée réalise un gain de résistance de 76 % mais montre une ductilité plus réduite. Le gain de force et la réduction de ductilité sont les deux conséquences principales du renforcement flexionnel des poutres en BA à l'aide de PRF. Les poutres qui se rompent par écrasement du béton, lorsqu'une grande quantité de composites est employée également possèdent une ductilité encore plus réduite. [65]



FigV.4 Courbes de charge- flèche pour poutres en BA renforcées et non renforcées [65]

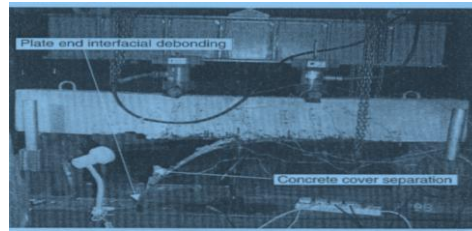
V.4.2.Rupture par cisaillement :

La poutre renforcée peut également se rompre fragilement par cisaillement. Tandis que des poutres normales en BA sont conçues pour échouer plutôt par flexion que par cisaillement, qui est un mode fragile, le mode de rupture par cisaillement peut devenir critique suite au renforcement flexionnel. Dans ce cas, c'est la capacité de cisaillement de la poutre seule qui impose sa résistance au cisaillement, la plaque de composite contribue peu dans cette résistance. Dans de telles situations, le renforcement de la poutre en BA au de cisaillement doit être effectué simultanément pour assurer que résistance flexionnelle requise n'est pas compromise par défaillance au cisaillement et que la rupture par flexion précède toujours celle par cisaillement. Cela est souhaitable car le mode de rupture par flexion d'une poutre renforcée, bien que fragile, est encore plus ductile que celui par cisaillement. [65]

V.4.3.Ruptures par décollement de l'extrémité :

La rupture prématurée de la poutre renforcée peut se produire avant que sa capacité flexionnelle finale soit atteinte suite au décollement des PRF à leurs extrémités. En générale, le mode de décollement le plus rapporté par les études expérimentales est celui de la séparation du béton d'enrobage (FigV.6-b) qui s'initie au niveau des extrémités de la plaque de PRF. Cette adhérence est très près derrière l'une des deux extrémités de la plaque d'hybride. Un autre mode de décollement, certes moins courant, est celui de la séparation de la plaque de PRF de la face de

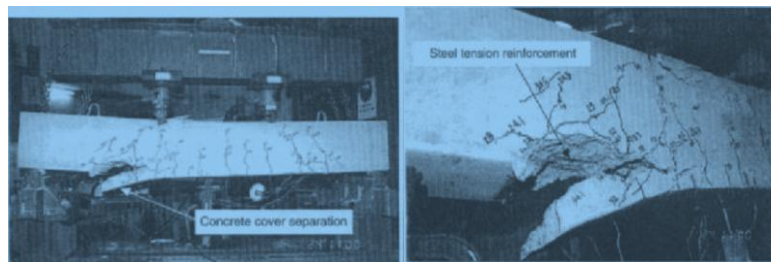
collage de la poutre en BA et qui s'initie également près de l'extrémité des plaques de PRF. Ces 2 modes de décollement peuvent se produire simultanément. [65]



FigV.5 : Poutre BA renforcée [65]

V.4.4.Séparation du béton d'enrobage :

C'est le mode de rupture prématuré le plus indiqué dans la littérature technique.



a) Vue générale

b) Vue rapprochée

FigV.6 : Poutre en BA renforcée - séparation de béton d'enrobage [65]

On croit généralement que la rupture de l'enrobage de béton est initiée par la formation d'une fissure derrière l'extrémité de la plaque de PRF, endroit où se développent des contraintes élevées de cisaillement et normales à cause de l'arrêt brusque de la plaque. Une fois cette fissure formée, elle se propage au niveau du renfort de tension et progresse horizontalement en son long aboutissant au résultat de la séparation de l'enrobage du béton. [65]

V.5. COMPORTEMENT DES POUTRES EN BETON ARMÉ RENFORCÉES PAR DES FIBRES DE CARBONE :

V.5.1.La résistance du renfort :

V.5.1.1.Traction dans la direction des fibres :

La relation contrainte-déformation du composite est linéaire jusqu'à la rupture sous la sollicitation de traction, donc c'est un comportement fragile pour ce matériau.

Les fibres supportent le principal de l'effort, parce qu'elles sont beaucoup plus rigides que la matrice. [4]

V.5.1.2.Compression dans la direction des fibres :

Théoriquement, on trouve les mêmes critères de résistance qu'à la traction.

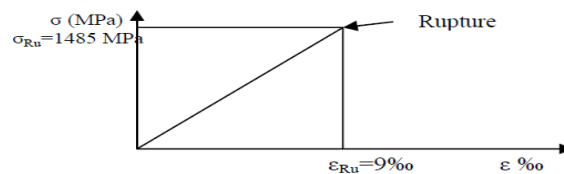
Les fibres, ayant un diamètre très faible, ont tendance à flamber ; c'est la matrice qui les stabilise, dans ce mode d'effort les propriétés de la matrice sont importantes. Ainsi les fibres de la nouvelle génération ont une résistance et une rigidité en traction plus élevées que les fibres de la première génération mais elles ne permettent pas d'obtenir un gain de résistance en compression. Pour augmenter les caractéristiques en compression, il faut augmenter les caractéristiques de la résine. [55]

V.5.1.3.Traction et compression transversales- dimensionnement des renforts :

Dans ces sollicitations, fibres et matrice sont soumises à des contraintes équivalentes, c'est le matériau le plus faible (la matrice) qui gouverne la résistance du composite. En règle générale,

le matériau composite est appliqué sur une structure soumise à l'action de son poids propre et des charges permanentes, il n'est donc sollicité que par les actions variables : charges d'exploitation et le cas échéant climatiques.

En règle générale, et pour une bonne application du composite, le renfort subit sous l'action de ces charges un allongement égal à celui de son support. [4]



FigV.7 : Loi de comportement du renfort [20]

Le module élastique du renfort est sensiblement égal à la moitié de celui de l'acier, la contrainte qu'il subit du fait des charges variables est voisine de la moitié de la variation de la contrainte de l'armature d'acier sous les mêmes charges ; cette variation, pour un ouvrage courant, est de l'ordre de 150 MPa au maximum, soit 10 à 15% de la contrainte de rupture. Elle est très inférieure au seuil de fatigue du matériau. [19]

Dans une section courante, le renfort se comporte comme une armature supplémentaire dont il est facile de tenir compte dans une vérification en flexion en application du diagramme des trois pivots tel que proposé par les règles CBA.93.

Une bande de 300 mm de largeur en une seule couche est susceptible de mobiliser une force de 250 kN à la rupture ; on notera qu'il n'est pas nécessaire d'appliquer à cette force un coefficient minoratif comme on le fait pour une tôle collée, car la faible épaisseur du renfort et son mode d'imprégnation rendent négligeable l'effet de la flexion. L'allongement à la rupture du matériau compris entre 1,2% et 1,9% est supérieur à la limite conventionnelle de 1% du diagramme des trois pivots, ce qui permet de prendre en compte la totalité des sections cumulées de l'armature existante et de celle du renfort. [19]

V.6. L'ELABORATION DES MODELES DE CALCUL :

V.6.1. Les caractéristiques des matériaux utilisés :

a. Le béton :

Les caractéristiques du béton utilisé dans cette étude sont les suivantes :

La résistance à la compression à 28 jours : $f_{c28}=27\text{Mpa}$.

La résistance à la traction : $f_{t28} = 0.6+0.06*f_{c28}$

$f_{t28}=2.22\text{Mpa}$.

Le module d'élasticité instantanée est $E= 11000* (f_{cj})^{1/3}$

$E=33000\text{Mpa}$.

Le coefficient de Poisson est $\nu=0.2$.

b. L'acier :

Les aciers utilisés ont des limites d'élasticité suivantes :

Les ronds lisses FeE24 $f_e = 215\text{MPa}$.

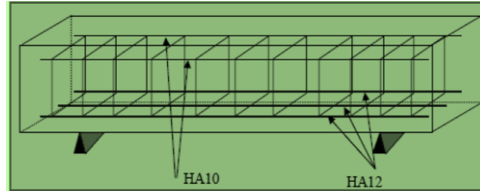
Les hautes adhérences FeE40 $f_e = 400\text{MPa}$.

Le module d'élasticité est $E=210000\text{Mpa}$.

Le ferrailage a été déterminé selon les règles B.A.E.L.91

Le ferrailage adopté pour les poutres d'essais est le suivant :

$A_s= 3\text{HA}12$ et une armature constructive $A_{sc}= 2\text{HA}10$



FigV.8 : le ferrailage adopté pour les poutres [4]

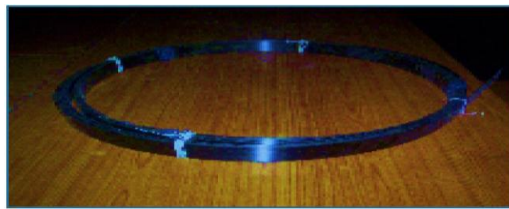
c. Les matériaux composites :

Il s'agit en effet d'un tissu de fibre de carbone mono directionnel SIKAWRAP et une Lamelle à base de fibres de carbone SIKACARBODUR. Ces composites sont collés sur les poutres après 30 jours au minimum de la date de leur coulage, sur la partie inférieure, les faces latérales ou même sur la partie supérieure selon le cas.

❖ Sika Carbodur lamelle :

Elle est composée de fibres de carbone agglomérées dans une matrice de résine époxydique avec un pourcentage volumétrique de fibres $> 68\%$. Elle est sous forme de rouleaux de 10, 25, 50 et 250 mètres.

La lamelle utilisée est de type S812 de largeur 80 mm, épaisseur 1,2mm et une section de 96 mm². Son module d'élasticité en traction est supérieur à 165 GPa, sa résistance en traction est supérieure à 2.8 GPa, et l'allongement à la rupture est supérieur à 1.7%. Il a une densité de 1,5 et est de couleur noire (FigV.3) [4].

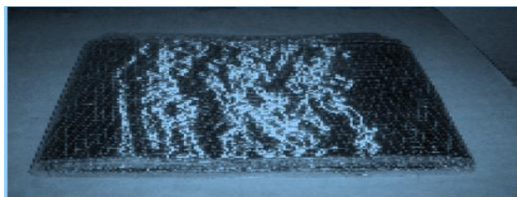


FigV.9 : Lamelle sika carbodur. [4]

❖ Tissu de Fibre de Carbone Sika Wrap (SIKAWRAP HEX 230 C)

Le SIKAWRAP HEX 230 C est un tissu de fibres de carbone, de masse surfacique égale 225 g/m², d'épaisseur de 0.13 mm, sous forme de rouleaux de longueur 45.70 m, de largeur 305 mm ou 610 mm et de couleur noire (FigV.10).

Sa résistance en traction est égale à 3500 MPa, son module d'élasticité en traction est de 230 GPa et l'allongement à la rupture de 1.5%.



FigV.10 : Sika Wrap (tissu monodirectionnel) [4]

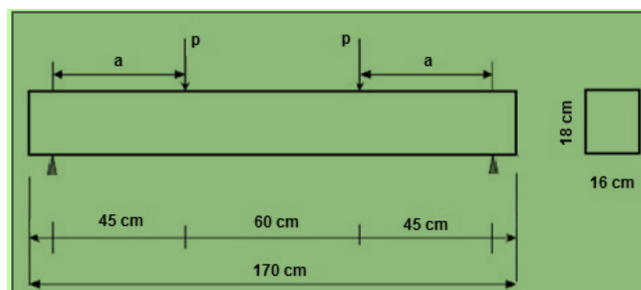
V.6.2. Les Modèles adoptés pour cette étude :

On a utilisé des poutres avec des sections rectangulaires soumises à un chargement concentré en flexion quatre points (symétrique).

Les caractéristiques géométriques des poutres ont été établies en fonction des dimensions du coffrage métallique disponible au niveau du laboratoire Génie Civil de l'ENP. D'autre part on a maintenu les mêmes dimensions que celles des spécimens d'A.AICHAOUI et ABDESSEMED afin de pouvoir comparer nos résultats.

Les poutres ont les dimensions suivantes : une longueur totale de 170 cm avec une longueur entre nus d'appuis de 150 cm, et la section transversale est de (16*18 cm²).

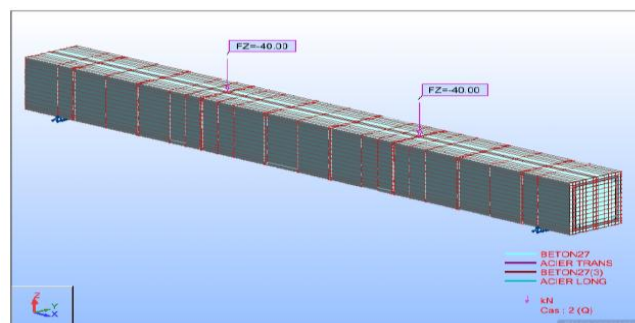
La figure (FigV.11) donne une illustration du schéma statique équivalent de poutres utilisées.



FigV.11 : Schéma statique de chargement

V.6.3. La poutre témoin en béton armé :

Le modèle de la poutre témoin est composé de 6272 éléments volumiques et 7425 noeuds (FigV.12) pour pouvoir représenter le ferrailage longitudinal, transversal et d'obtenir aussi des bonnes résultats numériques.



FigV.12 : Le modèle de la poutre témoin

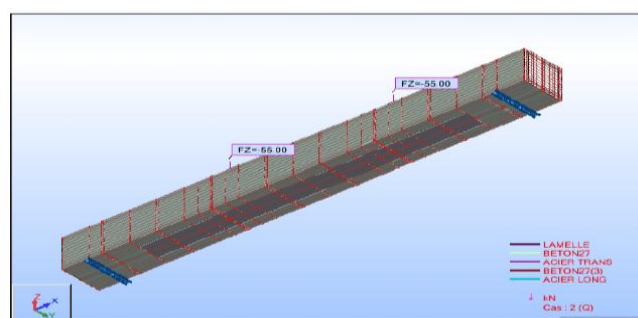
V.6.4. Les poutres renforcées :

Pour le renforcement des poutres en béton armé, deux (02) modes de renforcement ont été adoptés, selon les essais expérimentaux.

La notation des poutres est la même avec celle expérimentale (RAi) tel que (i) désigne le mode de renforcement envisagé (i allant de 1- 2).

V.6.4.1. La poutre renforcée RA1 :

Le renforcement par le composite est limité à la partie inférieure de la poutre par une lamelle de fibre de carbone (Sikacardur) et sur une longueur de 120 cm et une largeur de 8cm. Le modèle de la poutre renforcée RA1 est composé de 6416 éléments volumiques et 7600 noeuds

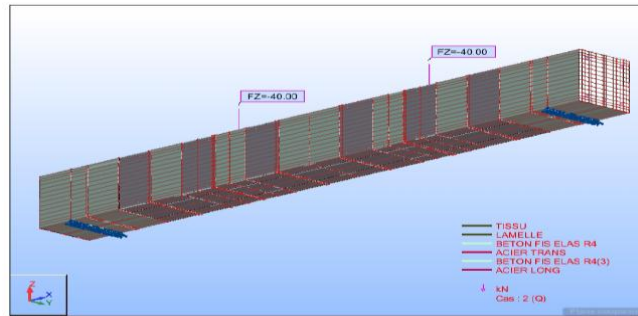


FigV.13 : Le modèle de la poutre renforcée RA1

V.6.4.2. La poutre renforcée RA2 :

C'est le mode appliqué en pratique pour les poutres de ponts : le renforcement de la poutre est effectué par une lamelle de fibre de carbone (Sikacarbodur) et de tissu SikaWrap en bandes sur toute la hauteur de chaque face latérale y compris la face inférieure. [4]

Le modèle de la poutre renforcée RA2 est composé de 7280 éléments volumiques et 8790 nœuds



FigV.14 : Le modèle de la poutre renforcée RA2

V.7. CONCLUSION :

Une des principales méthodes traditionnelles employée pour la réhabilitation des poutres fléchies en BA est le collage de plaques en acier. Cependant, les inconvénients de ces derniers vont de la difficulté d'application au manque de durabilité.

Le collage de plaques ou de feuilletés de PRF est devenu, ces dernières années, préférable pour le renforcement de ces poutres suite aux nombreux avantages qu'il procure.

Un certain nombre de modes de rupture a été observé pour des poutres en BA collées avec des PRF dans de nombreuses études expérimentales déjà réalisées.

Le risque de décollage est augmenté par un certain nombre de facteurs liés à la qualité d'exécution in-situ et à l'utilisation d'adhésifs faibles.

Les nombreux essais effectués sur des poutres renforcées à l'aide d'une plaque en acier ou en matériaux composites ont permis de recenser deux principaux types de délaminage. Le premier, appelé *peeling-off* débute sous une des charges concentrées et se propage rapidement jusqu'à l'appui le plus proche. Ce mode de rupture est observé avec une plaque de faible épaisseur et serait causé par l'ouverture d'une large fissure, l'action de l'effort tranchant et les irrégularités de la surface de collage. Le second type de délaminage provoque l'arrachement de la couverture de béton à l'une des extrémités de la poutre. Ce mode de rupture est commun sur les poutres renforcées avec une plaque plus épaisse et serait causé par de fortes contraintes dans l'interface plaque-béton à l'extrémité de la poutre.

L'utilisation d'un programme de calcul numérique permet aux chercheurs de gagner du temps mais le plus important est la maîtrise de l'aspect théorique du problème posé.

CHAPITRE VI :

RESULTATS

NUMERIQUES ET

INTERPRETATIONS

VI. RESULTATS NUMERIQUES ET INTERPRETATIONS

VI.1.INTRODUCTION :

Le dimensionnement des structures par la méthode des éléments finis donne, dans la plus part des cas, une bonne précision. La complexité du problème réside dans le choix des paramètres à introduire, ces paramètres peuvent être cinématiques ou mécaniques.

Ce chapitre est consacré à une présentation des résultats de notre étude avec leurs interprétations. De même, ces résultats, présentés sous forme de courbes et de graphes, sont confrontés avec ceux obtenus expérimentalement par d'autres chercheurs.

VI.2.LES RESULTATS DE L'ETUDE NUMERIQUE :

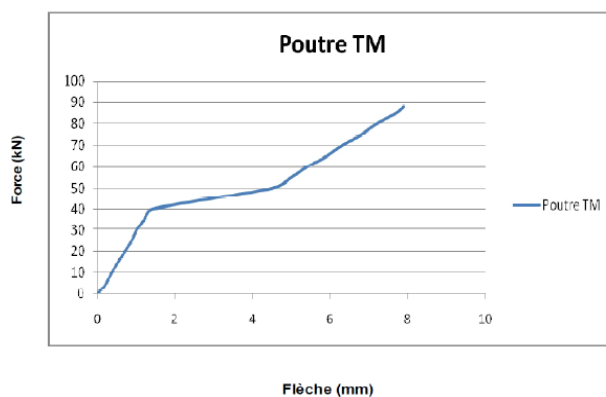
VI.2.1.Poutre témoin en béton armé :

Cette poutre en béton armé désignée par TM est chargée jusqu'à la rupture totale avec un suivi des résultats obtenus sous forme de flèches à mi travée et à L/3 de la poutre.

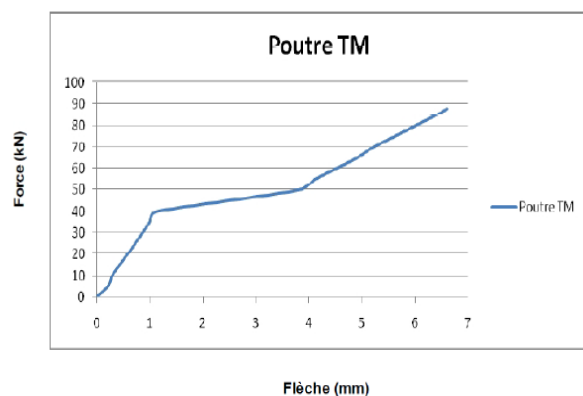
a. Courbes Force – Flèche :

Les courbes force – flèche à mi- travée et à L/3 de la poutre témoin sont données dans les figures VII.1, VII.2, on remarque les deux phases suivantes :

- Une phase de « béton armé non fissuré » où la flèche croît linéairement avec la charge, la flèche atteinte est d'environ **2,2 mm**.
- Une phase de « béton armé fissuré plastique ». La flèche atteinte à mi- travée est de **7,7mm**.

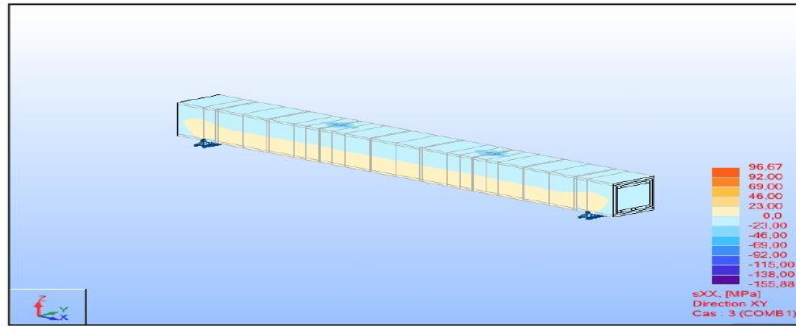


FigVI.1 : Courbe force-flèche à mi- travée de la poutre témoin.



FigVI.2 : Courbe force-flèche à L/3 de la poutre témoin.

La figure (Fig. VII.2) donne la courbe force-flèche à un tiers de la portée libre de la poutre témoin, on constate une légère diminution de la flèche, ceci s'explique par le tracé d'une poutre fléchie où la flèche n'est pas la même le long de la poutre.



FigVI.3 : La distribution des contraintes de traction et de compression dans le béton De TM (Sous une charge de 40 kN).

VI.2.2.Poutres renforcées :

Deux (2) types de renforcement ont été utilisés et les résultats sont présentés ci-dessous

VI.2.2.1. Poutre renforcée par une lamelle sur la face inférieure (RA1) :

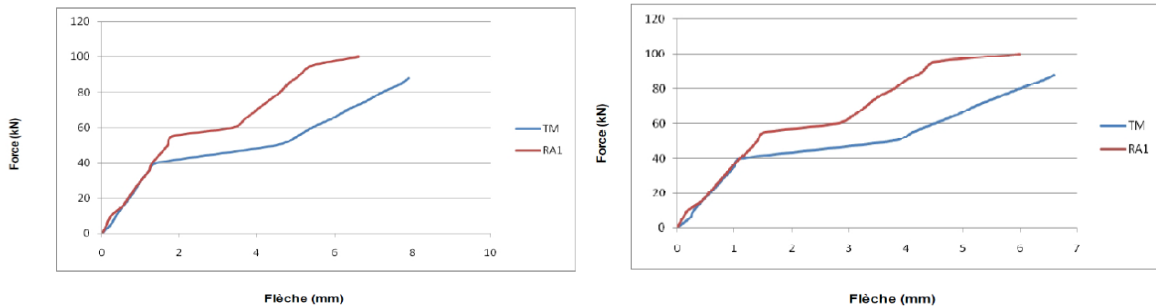
Le renforcement par le composite est montré sur la figure (FigVII.4). Il est limité à la partie inférieure de la poutre sur une longueur de 120 cm. La courbe force-flèche au milieu est donnée par la figure (FigVII.4). Les trois phases observées avec les poutres en BA sont aussi observées avec les poutres renforcées.

Durant la première phase aucune fissure n’apparaît, le renfort subit sous l’action de ces charges un allongement égal à celui de son support lui-même.

La rupture est à une charge de 100 kN (par effort tranchant d’un seul côté).

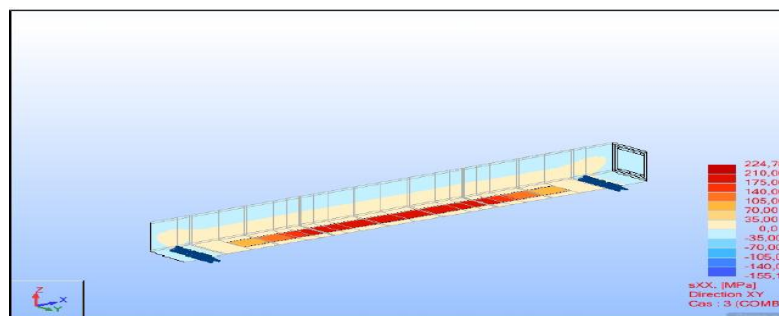
Le gain en termes de capacité portante par rapport à la poutre témoin est **13,4%**.

La flèche de rupture est de **6.3 mm** en comparaison à **7,7 mm** pour la poutre de référence TM, soit une diminution de **16,40%**.



FigVI.4 : Courbe force-flèche à mi- travée et à L/3 de la poutre renforcée RA1

La courbe force-flèche à L/3 de poutre renforcée RA1 est donnée à la figure (FigVII.5) où on constate toujours une diminution de la flèche, ceci peut s’expliquer dans ce cas, par la présence de la lamelle qui répartit mieux la fissuration et rigidifie d’avantage la poutre.



FigVI.5 : La distribution des contraintes de traction et de compression au niveau de la poutre renforcée RA1.

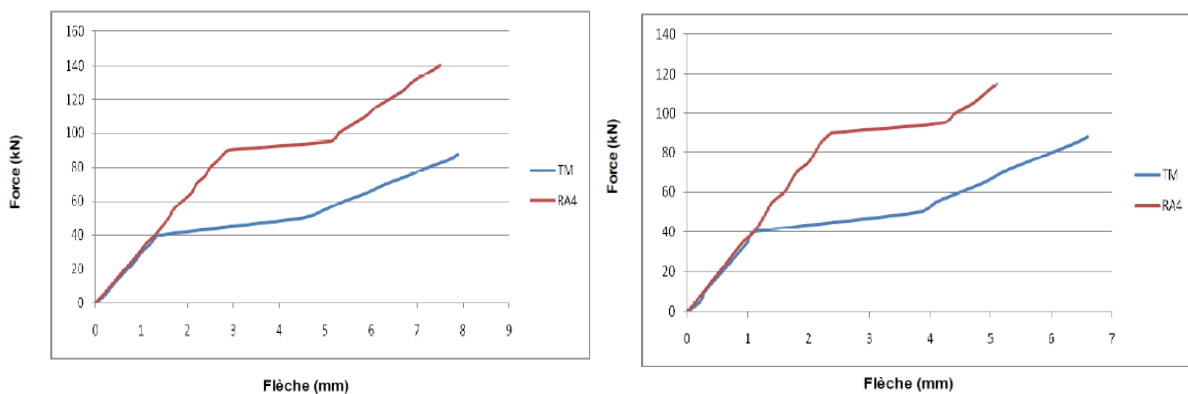
Ces cartographies montrent que le renforcement par lamelle de fibre de carbone Sika Carbodur ne réduit pas considérablement la contrainte dans le béton comprimé car elle est placée sur la face inférieure de la poutre. Cependant, on remarque une diminution de la déformation des aciers par rapport à la poutre de référence, en raison du rôle joué par la lamelle comme une armature additive.

On constate pour ce mode de renforcement une nette augmentation du module d'élasticité ainsi qu'une augmentation de la plage élastique, et par conséquent une augmentation de la rigidité de la poutre.

VI.2.2.2. Poutre renforcée par une lamelle sur la face inférieure et des bandes de tissu sur les faces latérales (RA2) :

Le renforcement par lamelle et par tissu de composite est illustré sur la figure (FigVII.6). Ce type est généralement le mode le plus utilisé dans la pratique surtout pour le cas de renforcement des ponts.

La figure VII.6 présente la courbe force-flèche à mi-travée de la poutre renforcée RA2. La flèche à la rupture est de **7.3 mm** soit une diminution de **4.9%** par rapport à la poutre témoin.



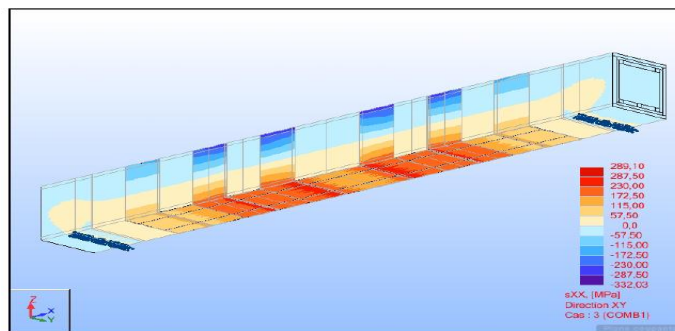
FigVI.6 : Courbe force-flèche à mi-travée et à L/3 de la poutre renforcée RA2

Ce type de renforcement présente une meilleure performance en termes de résistance par rapport aux autres types de renforcement (RA1). Ceci est dû à l'utilisation d'un double renforcement « lamelle de Sikacarbodur et tissu de Sikawrap par bandes », où le premier renforcement empêche l'apparition et le développement des fissures dues aux sollicitations de flexion, tandis que le deuxième retarde la rupture en empêchant l'apparition des fissures inclinées de cisaillement.

La rupture se fait à 140 kN avec un gain de 59% par rapport à la charge de rupture de la poutre de référence.

Dans la courbe force-flèche à L/3 de la poutre RA2, On remarque que la flèche obtenue à la rupture est plus importante relativement à celle des autres modes. Ce qui nous permet de dire que ce type de renforcement favorise le critère de ductilité de la poutre renforcée avec un gain en termes de capacité portante très significatif.

On remarque une nette diminution des contraintes de traction et de compression dans l'acier avec une charge de 40 kN, et ceci s'explique par l'effet très important du composite additif de ce mode sur le comportement des poutres en béton armé que ce soit en traction ou en compression.



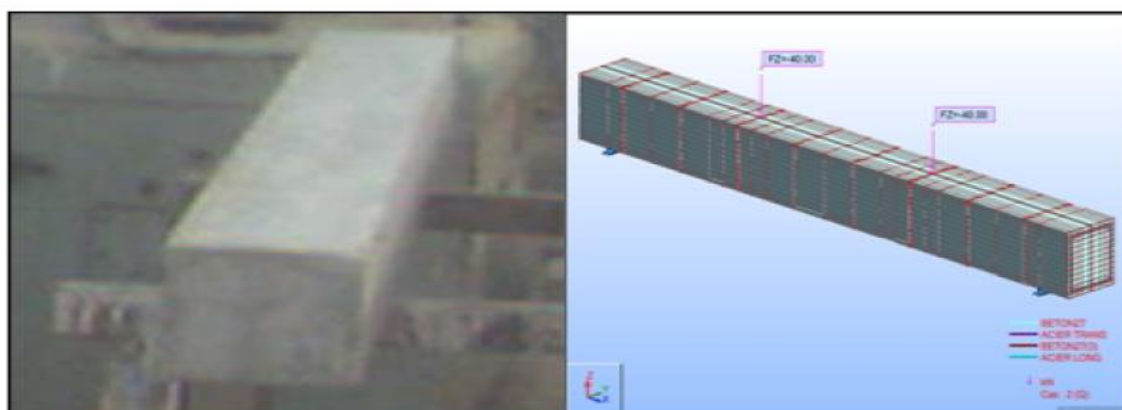
FigVI.7 : La distribution des contraintes de traction et de compression au niveau de la poutre renforcée RA2

VI.3. COMPARAISON DES RESULTATS NUMERIQUES OBTENUS AVEC LES RESULTATS EXPERIMENTAUX :

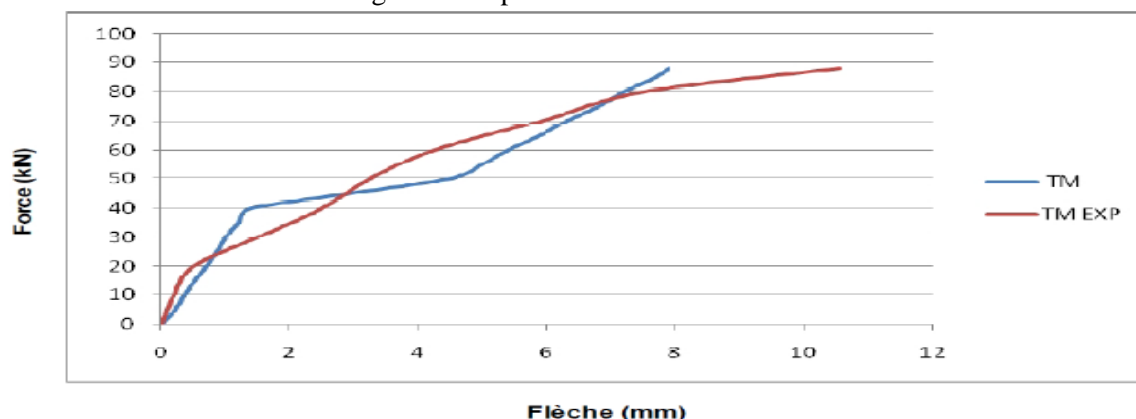
Le travail expérimental effectué au sein de laboratoire de l'ENP par Monsieur **A.LAICHAOUI(1)** nous a permet de comparer nos résultats théoriques et de valider nos modèles numériques.

La confrontation des résultats est essentiellement basée sur la comparaison des diagrammes force-flèche, plus précisément sur la flèche de rupture à mi- travée des poutres (résultats expérimentaux disponibles). .

VI.3.1.La poutre témoin :



FigVI.8 : La poutre témoin en béton armé.

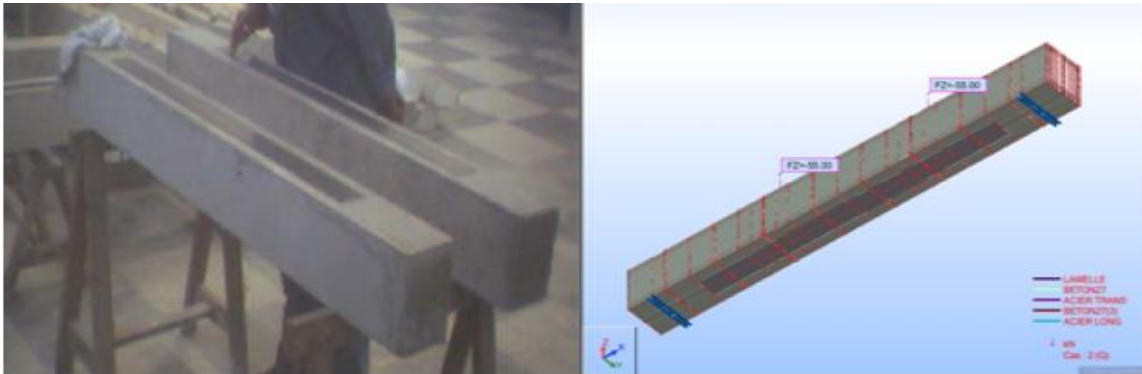


FigVI.9 : Diagramme force-flèche à mi- travée de la poutre témoin (num-exp).

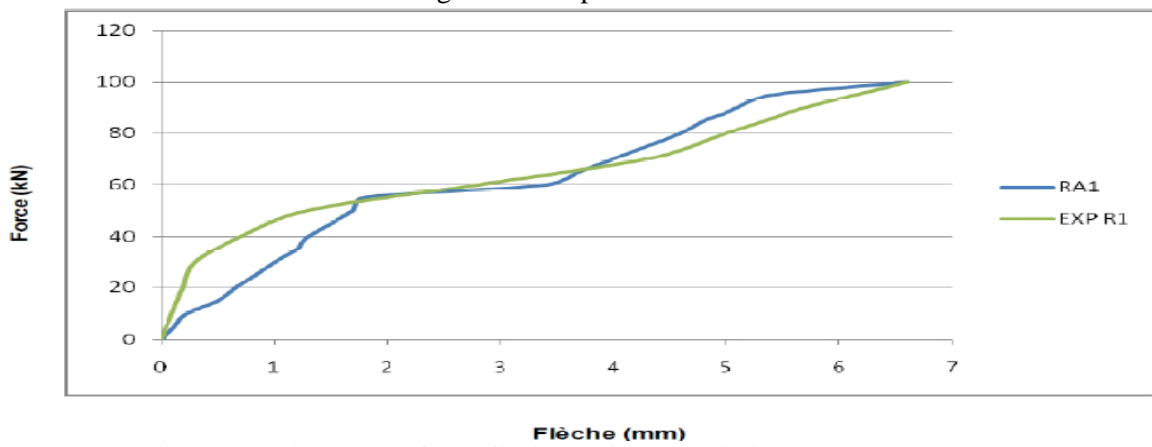
On remarque que la flèche de rupture obtenue numériquement est de 7.7 mm alors que celle expérimentale est de 10.45 mm, soit une déférence de 24%.

La valeur expérimentale est plus élevée par rapport à la valeur numérique en raison de non prise en compte de certains paramètres qui influent sur la charge de rupture.

VI.3.2. La poutre renforcée RA1 :



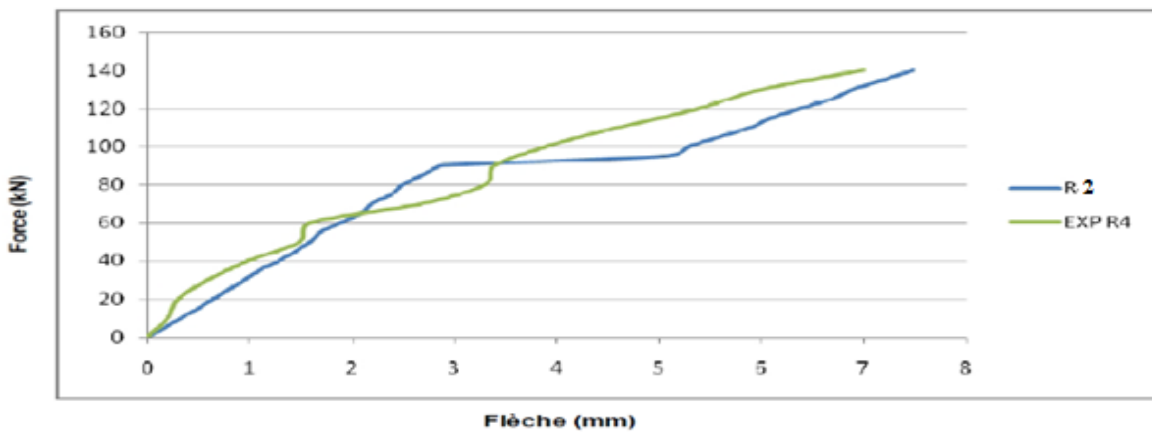
FigVI.10 : La poutre renforcée RA1.



FigVI.11 : Diagramme force-flèche à mi- travée de la poutre RA1 (num-exp)

Dans ce type de renforcement, on remarque que la flèche expérimentale et numérique se confond. La flèche de rupture obtenue numériquement est de 6.3 mm et celle expérimentale est aussi 6.3 mm.

VI.3.3. La poutre renforcée RA2 :



FigVI.12 : Diagramme force-flèche à mi- travée de la poutre RA2 (num-exp)

On remarque pour ce modèle, que la flèche de rupture obtenue numériquement est de 7.3 mm alors que celle expérimentale est de 7 mm soit une différence de 3%.

Donc on peut conclure que ces résultats numériques en termes de flèches sont acceptables malgré la complexité des modèles choisis (prendre en considération : le ferrailage longitudinal et transversal ainsi que le matériau de renfort). On remarque, dans la plupart des modèles, une différence entre 3 et 7% de la flèche de la rupture.

Le tableau suivant récapitule quelques résultats importants, comme : l'augmentation de la capacité portante des poutres (A.C.P (%)), La diminution de la flèche de rupture (D.F.R(%)), la flèche de rupture numérique (F.R.N(%)) et expérimentale (F.R.EX(%)).

Tab VI.1 : Tableau récapitulatif de quelques résultats importants

Mode	A.C.P(%)	D.F.R (%)	F.R.N (mm)	F.R.EX(mm)
TM	/	/	7,7	10,45
R1	13.4	16,40	6,3	6,3
R2	59	3	7,3	7

VI.4. CONCLUSION :

Les résultats obtenus numériquement nous ont permis de tirer quelques remarques importantes concernant l'effet bénéfique du renforcement au moyen des matériaux composite et même sur la fiabilité des modèles développés.

Les principales remarques sont les suivantes :

- Tous les types de renforcement ont joué un rôle bénéfique dans la réduction des déformations de l'acier, du béton et sur la résistance ultime des poutres.
- Le renforcement des poutres en béton armé avec des tissus ou des lamelles joue un rôle très important pour empêcher ou retarder les différents types de fissures.
- La poutre renforcée RA2 présente une meilleure performance en termes de résistance ultime puisque la lamelle joue un rôle de soulagement et d'aide aux aciers longitudinaux pour reprendre les efforts de flexion, et les bandes de tissu ont joué le rôle d'étriers et ont aidé les aciers transversaux à reprendre l'effort tranchant.
- La confrontation avec les résultats expérimentaux nous a permis de confirmer ceux obtenus numériquement. Toutefois, on remarque une différence acceptable qui est due, de notre point de vue, au non prise en compte de certains paramètres pour la modélisation à cause de la complexité rencontrée durant le développement des modèles.

CONCLUSION

GENERALE ET

RECOMMANDATIONS

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSIONS GENERALE :

L'utilisation des matériaux composites dans la réparation et le renforcement des poutres en béton armé a fait l'objet de ce travail. En fait dans le cadre de la réhabilitation, le processus de l'introduction des matériaux composites à base de fibres a été accéléré par la mise au point de méthodes techniquement fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés de renforcement à base d'acier. Les fibres de carbone ou de verre présentent en effet divers avantages : faible densité, absence de corrosion, excellentes propriétés mécaniques, très bonne tenue à la fatigue et facilité de manipulation.

Un des grands avantages de ce procédé de réparation est la possibilité de renforcer la structure sans interrompre l'exploitation de l'ouvrage. On peut tout de même noter un coût de fabrication de matériaux composites encore élevé. Mais cette contrainte économique est moindre par rapport à la reconstruction des ouvrages et à la valeur culturelle des patrimoines historiques.

Le procédé TFC est un procédé breveté de renforcement structural par collage d'armatures additionnelles à base de fibres de carbone.

Le procédé est basé sur le principe d'un placage de matériau résistant aux efforts de traction et judicieusement collé sur les zones tendues de la pièce à renforcer pour en augmenter les performances en fonctionnement. Le procédé a essentiellement un rôle de renforcement structural aux efforts engendrés par les effets de flexion comme d'efforts tranchants.

Le TFC est un composite à base de fibres de carbone matricées dans un liant synthétique appliqué à froid dans le but d'être intégré par adhérence au support pour équilibrer les tractions induites dans la section.

La mise en œuvre du composite directement sur le support permet de mouler la forme exacte de la pièce à renforcer, de ne pas manier des plaques lourdes ou encombrantes, de ne pas avoir d'autre interface de collage avec le support que la matrice même du composite, et donc de ne pas générer de concentration de cisaillement pouvant provoquer des amorces de décollement dans les zones de faible épaisseur de résine.

Grâce aux recherches menées ces dernières décennies sur l'usage de matériaux composites dans le génie civil, elle met en œuvre le collage d'un tissu mince de fibres de carbone (TFC) à l'aide d'une résine thixotrope de base époxy. La grande originalité du procédé est que le collage se fait à froid et sans pression de placage grâce à la mise au point d'une fibre et d'une colle spécialement étudiées pour les applications de BTP. En plus des propriétés exceptionnelles des matériaux composites, la technique offre une simplicité de mise en œuvre et une maniabilité qui permettent d'envisager le plus grand nombre d'applications dans les conditions les plus variées.

La mise au point de cette nouvelle technique de réparation vient apporter aux problèmes de renforcement d'ouvrages une solution fiable et définitive, d'un encombrement très réduit pour des performances optimum. Insensible à la corrosion, le TFC possède des propriétés exceptionnelles de résistance aux agressions chimiques.

De nombreuses applications ont à ce jour été réalisées tant dans le domaine du bâtiment que dans celui des ouvrages d'art.

Le domaine du génie civil est actuellement assez peu consommateur de matériaux composites comparativement à d'autres secteurs tels que celui de l'automobile et l'aérospatiale. Cependant, il existe de réelles perspectives dans les prochaines années quant à leur utilisation structurelle pour la réhabilitation des constructions civiles et industrielles. D'où l'intérêt durant la décennie précédente pour étudier les différents aspects du renfort et réparation des éléments structuraux de construction en béton par des matériaux composites

On peut utiliser les polymères renforcés de fibres (PRF) collés pour tous les renforcements et toutes les réparations de structure en béton, les poutres en BA sont parmi les éléments structuraux qui ont certainement fait l'objet de plus de recherches et d'application dans ce domaine. Il est établi que le gain en résistance et en déformation de poutres réhabilités à l'aide de PRF dépend de plusieurs paramètres relatifs aux propriétés géométriques et mécaniques du composite, au traitement de la surface de collage, à la qualité de la couche d'adhésif, etc. Ces paramètres influent également sur le mode de rupture des poutres en BA, celui par décollement des extrémités des lamelles de PRF étant le plus fréquent.

La contribution du TFC à la résistance au cisaillement de la poutre est plus importante lorsque les bandes sont perpendiculaires à la fissure d'effort tranchant et sont en forme de U. Les résultats des essais ont montré que par ce procédé on peut augmenter la charge de ruine des poutres. Néanmoins, le risque de décollement est également augmenté par un certain nombre de facteurs liés à la qualité de l'application in-situ. Ceux-ci incluent la mauvaise exécution et l'utilisation des adhésifs faibles.

Dès le début du chantier et au fur et à mesure du renforcement des structures, l'entreprise doit être réalisée un ensemble de contrôles et valide les différentes étapes de sa mise en œuvre.

Les informations et les résultats sont inscrits sur une fiche d'autocontrôle mise à la disposition du Bureau de Contrôle ou du Maître d'Œuvre.

Soulignons l'importance des contrôles suivants :

Contrôle du support : cohésion, planimétrie, relevé des fissures.

Contrôle des produits : notification, performances mécaniques.

Contrôle des travaux : conditions et date de mise en œuvre

Contrôles finaux : continuité du collage.

Le calcul des performances à moyen et à long terme de structures béton armé renforcées par matériaux composites présente un intérêt majeur. Des procédures adaptées doivent être utilisées. Le logiciel d'analyse et calcul des poutres en béton composite (LACPBC) a été développé dans cette optique. Il a pour objectif l'analyse du comportement des poutres en BA, en considérant des lois de comportement réelles pour les matériaux (fissuration du béton en traction, plastification du béton en compression, plastification des aciers, linéarité élastique du composite). A ceci s'ajoute la possibilité d'évaluer la déformation (flèche) de l'élément renforcé. Le développement du logiciel **ROBOT** constitue une véritable contribution de cette étude pour mettre à la disposition des bureaux d'études et chercheurs un outil de calcul performant pour le dimensionnement des poutres renforcées ou réparées par PRF.

Notre étude nous a permis de tirer quelques conclusions et en faire quelques recommandations :

- Les phases de comportement d'une poutre en béton armé renforcée par des fibres de carbone sont les mêmes avec une poutre en béton armé sans renforcement.

- Tous les types de renforcement ont joué un rôle bénéfique dans la réduction des déformations de l'acier, du béton et encore sur la résistance ultime des poutres.
- Le renforcement des poutres en béton armé avec des tissus ou des lamelles joue un rôle très important pour empêcher ou retarder les différents types de fissures.
- On constate une nette augmentation de la capacité portante des poutres renforcées (de 13 à 59%) et une diminution considérable de la flèche de rupture (de 5 à 26.58%).
- On peut augmenter la résistance à la flexion par un renforcement à l'aide des lamelles et aux efforts tranchants en ajoutant des étriers en tissu de fibres de carbone, en forme de U.
- On remarque qu'il y a une bonne corrélation entre nos résultats obtenus avec ceux expérimentaux.
- Les programmes de calcul en éléments finis peuvent donner un bon résultat en ce qui concerne le dimensionnement de ces types de renfort à conditions de tenir compte de certains paramètres liés au comportement mécanique de la structure renforcée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ABDESSEMED.M, « *Comportement des poutres isostatiques en béton armé renforcées par tissu et lamelle de fibre de carbone* », Mémoire de magister, Université de Blida, Algérie, 2003.
- [2] M. Abdessemed, S. Kenai, A. Bali, A. Kibboua, B.Guillier, J.L.Chatelain" *Suivi et comportement des poutres de ponts en béton renforcées par composites collés*" 17ème Colloque National AFPS 2007 – Ecole Centrale Paris.
- [3] BREYSSE D., ABRAHAM O., « *Méthodologie D'évaluation Non Destructive De L'état D'altération Des Ouvrages En Béton* », ISBN 2-85978-405-5, Presses de l'École Nationales des Ponts et Chaussées (Paris), 555 p. (2005).
- [4] A. AICHAOUI, « *Analyse expérimentale du comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites*», Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Décembre 2006.
- [5] A.AIDOU, A.BENOUIS, "*Pathologie des Constructions : Du Diagnostic à la Réparation, Influence du taux de chargement pour les poutres réparées en flexion*". Colloque National Pathologie des Constructions, Département de Génie Civil Université Mentouri Constantine - 25 et 26 Novembre 2008.
- [6] F. Al Mahmoud "*technologie de renforcement des poutres en béton armé par l'insertion de joncs de carbone*", l'Institut National des Sciences Appliquées de TOULOUSE, 2007.
- [7] Ahmed Al-Ostaz FINAL REPORT "*Diagnostic evaluation and repair of deteriorated Concrete bridges*" DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING UNIVERSITY OF MISSISSIPPI 2004.
- [8] E. Ferrier, S. Avril, P. Hamelin I and A. Vautrin, « *Mechanical behavior of RC beams reinforced by externally bonded CFRP sheets*», Matériaux et Constructions, Vol. 36 Octobre 2003, pp 522-529.
- [9] P. BARDONNET. « *Résines époxydes : composants et propriétés* ». Techniques de l'ingénieur, 1992, traité Plastiques et Composites.
- [10] J.BARON and J-P OLLIVIER EDS : « *la durabilité des bétons* » (press national de ponts et chausse1992).456pp.
- [11] M. BENMILOUD, M. BOUHICHA et M.F. LAKHDARI, « *Application de la mécanique de la rupture sur le comportement des poutres renforcées par collage des plaques d'aciers* », Université de Laghouat, Algérie.
- [12] BERTHELOT J/M., « *matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures* » 4ieme édition, Lavoisier, 2005.

[13] Stéphanie BONNET et Abdelhafid KHELIDJ GeM “Marine Environment Damage to Atlantic Coast Historical and transport works or Structures: methods of diagnosis, repair and of maintenance”. - IUT de Saint Nazaire - rue Michel Ange 44600 Saint Nazaire.

[14] S. CHATAIGNER*, A. GAGNON**, M. QUIERTANT***, K. BENZARTI***, C. AUBAGNAC *** Université Paris Est – IFSTTAR – 58 Bd Lefebvre - 75 732 PARIS Cedex 15
« Renforcement des ouvrages »/ AOÛT-OCTOBRE 2011.

[15] Riad Benzaid, Habib Mesbah and Nasr Eddine Chikh « matériaux composite pour le confinement externe du béton» version1 janvier2013 INSA Rennes France.

[16] GUICHARD Florianne. MERCIER Bertrand/2012/2013/ Rapport de projet de fin d'études - ENSTIB 3 « Renforcement des poutres en bois par un tissu de fibres de carbone ».

[17] J. BLEVOT et J. PERCHAT, « Comportement expérimental des éléments en béton armé soumis à différents modes de sollicitations », Technique de l'ingénieur, Vol C2, 2000.

[18] Pierre-Alexandre BRIEMEL Projet de Fin d'études /Spécialité Génie Civil/ Elève ingénieur, INSA de Strasbourg/ septembre 2013 : « Simulation numérique du renforcement de structures en béton armé par des renforts en fibres végétales et comparaison au renforcement par des fibres de carbone » .

[19] C. DJELAL, E. DAVID, F. BUYLE-BODIN et Y. GICQUEL, « Renforcement des poutres en béton armé à l'aide de lamelle composites », Annales du bâtiment et des travaux publics, France, pp 39-47, Février 1998.

[20] CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES–SIKA, « SIKA CARBODUR- SIKA WRAP –CCT n°37 », enquête technique SOCOTEC n° HX 0823, Février 2006.

[21] CALGARO J. A. & LACROIX R., «Maintenance et réparation des ponts», Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, France, 1997, 665 p.

[22] Jean-Armand CALGARO et Roger LACROIX : Techniques de l'Ingénieur « Pathologie et évaluation des ponts existants ».

[23] Jean-Armand CALGARO et Roger LACROIX : Techniques de l'Ingénieur «Projet de renforcement ou de réparation d'un pont ».

[24] Jean-Armand CALGARO et Roger LACROIX .Technique de l'ingénieur C 4 503 « Projet de renforcement ou de réparation d'un pont ».

[25] T. CHICOINE, « Analyse et conception d'ancrages sur les poutres renforcées en flexion à l'aide de matériaux composites », Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Canada, 1997.

[26] A. Merdas et N.Chikh "Renforcement des poutres en béton armé par des matériaux composites utilisant la technique NSM", Université Ferhat Abbas, Sétif, Novembre 2008.

[27] ACI Committee 222, « Protection of Métaux in Concrete Against Corrosion » American Concrete Institute Matériaux Journal, 2001.

[28] Tania CROSTON, «*Etude expérimentale du comportement d'une poutre en béton armé en flexion 3 points réparée par matériaux composites (approche probabiliste)* », thèse de doctorat, juin 2006 d'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France.

[29] M. Thiery, P. Dangla, G. Villain et G. Platret, « *Modélisation du processus de carbonatation des matériaux cimentaires* ». In 1er Congrès International sur la Technologie et la Durabilité (C.I.T.E.D.U.B), Page 1-10, Alger (Algérie) 2004.

[30] D.T Nguyen, A. Limam, J.F Georgin, J.M Reynouard, G. Michel, D. Dauffer *URGC-Structures, INSA de Lyon, 34, Avenue des Arts 69621 Villeurbanne* : « *Caractérisation et qualification du renforcement en TFC de dalles béton armé endommagées* ».

[31] D.T Nguyen, A. Limam, J.F Georgin, J.M Reynouard, G. Michel, D. Dauffer, « *Caractérisation et qualification du renforcement en TFC de dalles béton armé endommagées*», URGC-Structures, INSA de Lyon, 2001.

[32] Victor DAVIDOVICI « *Renforcement avec tissu de fibre de carbone* »TFC FREYSSINET.

[33] « *Diagnostic des réparations minces des ouvrages en béton par les ultrasons*» Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique Université 8 mai 1945 Guelma/2013.

[34] TROTIGNON J/P., VERDU J., DOBRACZYNSKI A., PIPERAUD M, « *Matières plastiques : structures – propriétés, mise en œuvre, normalisation* », Nathan, 1996.

[35] Document béton armé.

[36] Documents scientifiques et techniques AFGC : "*Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion*" Novembre 2003.

[37] P. DUQUETTE, « *Renforcement en flexion de poutres en béton armé à l'aide de plaques en matériaux composites réalisées in situ* », Mémoire de maître en sciences, Université Laval, Canada, 1998.

[38] Durcissement et renforcement des matériaux.

[39] Durcissement- Renforcement des matériaux /Amphi_20.

[40] Zakia Draïdi, «*Renforcement et réparation des coques métalliques par matériaux composites (TFC)-Etude du comportement au flambage-Approche expérimentale et numérique*», thèse de doctorat en 2005 de l'INSA de Lyon, France.

[41] Jean de Gaspé Lizotte, Juan Echague « *Renforcement des poutres en béton par tissus en fibre de carbone au pont Champlain* ».

[42] Freyssinet / « *Conception-Réalisation : Polynôme – Exécution* » : Planète Graphique Studio.

[43] FUENTES A, « *Le béton armé après fissuration*», 2ème Edition, Editeur : EYROLLES, 1987.

[44] GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES - CARMA - Actualisation décembre 2004.

[45] Bruno GODART et André LE ROUX. Technique de l'ingénieur C 2 252 « *Alcali-réaction dans le béton Mécanisme, pathologie et prévention* ».

[46] César DÍAZ GÓMEZ Docteur architecte ; Professeur des universités au Département des Constructions architecturales I de l'École technique supérieure d'Architecture de Barcelone, Université polytechnique de Catalogne, Espagne/«*Les techniques de réhabilitation*» : *renforcer les structures*.

[47] Groupe Spécialisé n°3 /Commission chargée de formuler des Avis Techniques.
24Janvier 2011 /Sika CarboDur® .SikaWrap® : « *Eléments de structure en béton armé et précontraint, renforcés par un procédé de collage de fibres de carbone* ».

[48] S. Haouara, A. Guettala "*les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en béton armé dans la région de Biskra*" Courrier du Savoir – N°06, Juin 2005, pp.109-116 Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 2005.

[49] Guide à l'usage de subdivisions « *Entretien des ouvrages d'Art* ».

[50] Guide technique décembre 2002 « *Protection des bétons par application de produits à la surface du parement* » Document diffusé par : Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 58, boulevard Lefebvre F-75732 PARIS Cedex 15.

[51] Patrick Guiraud Construction Moderne / Annuel Ouvrages d'art 2011/ « *Les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton* ».

[52] Manh Hung Ha « *Modélisation des architectures, le renforcement tridimensionnel dans les structures composites* ». Other. Université de Technologie de Compiègne, 2013. French. <NNT : 2013COMP2131>. <tel-00975259>.

[53] Hamlaoui Salim /Magistère de l'Université Mohamed Khider – Biskra : « *Maintenance, entretien et réparation des ponts* » 09/12/2012.

[54] Selma Haouara « *les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en béton armé dans la région de Biskra* » Mémoire de Magistère 2004 universités de Biskra faculté des sciences et sciences de l'ingénieur Département de Génie Civil laboratoire de génie civil.

[55] M. HEMAIDI ZOURGUI NADJIB “ MODELISATION NUMERIQUE D'UNE POUTRE EN BETON ARME RENFORCEE PAR LAMELLES ET TISSUS EN FIBRES DE CARBONE ”.

[56] W.Hoorpah et M.Vigo "*Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion*" Groupe de travail AFGC Documents scientifiques et techniques, Novembre 2003.

[57] W.Hoorpah et M.Vigo "*Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages*" Groupe de travail AFGC, Documents scientifiques et techniques mars 2004.

[58] La voie du développement durable.

[59] Les composites : « *Conception, applications* » Laboratoire de Génie Mécanique.

[60] Les matériaux composites Dynamisme et innovation/Le 4 Pages des statistiques industrielles/ N° 158 - février 2002.

[61] S. MAROUANI, L. CURTIL, P. HAMELIN, «*Influence des conditions de mise en œuvre des composites à matrice polymère utilisés pour la réparation et/ou le renforcement des ouvrages en béton*», XXIIIème Rencontres Universitaires de Génie Civil 2005 – RISQUE & ENVIRONNEMENT. Grenoble, France.

[62] SIDNEY M, JOHNSON traduit par MICHEL LONDEZ «*dégradation, entretien et réparation des ouvrages du génie civil* » Edition EYROLLES 1969, 439 p.

[63] MOISSON Marc «*Contribution à la maîtrise de la réaction Alkali silice par ajout de fines de granulats réactifs dans le béton* » THESE Doctorat de L'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. 2005.

[64] J. Skalny, J. Marchand and I. Odler "*Sulfate Attack on Concrete*" édition Taylor & Francis e-Library, 2003 217p.

[65] Mr. Merdas ABDELGHANI : thèse de magister en génie civil/Option : matériaux et durabilité des constructions «*utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA* » / 08 / 02 / 2005.

[66] P.Kumar Mehta Paulo J.M.Monteiro «*Concrete Microstructure, Properties, and Materials Third Edition* » Department of Civil and Environmental Engineering University of California at Berkeley publiée par McGraw-Hill 2006 p 647.

[67] Duy Huu PHAM*, Hau NGUYEN**, Maxime NICOLAS *** * Ecole Supérieure de Transports et de Communications, Cau Giay, Hanoï, Vietnam ** Laboratoire IUSTI, UMR 6595, CNRS-Aix Marseille Université, 5 rue Fermi, 13453 Marseille cedex 13, France : «*polymères renforcés par des fibres de carbone (prfc).une application sur le renforcement des ponts au Vietnam* ».

[68] NODAL CONSULTANTS «*L'industrie française des matériaux composites* »

[69] Jean-Pierre OLLIVER et Angélique VICHOT «*La durabilité des bétons*» Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, France, 2008, 867 p.

[70] J. PERCHAT, «*Béton Armé, Règles BAEL, Pièces soumises à des sollicitations normales* », Techniques de l'Ingénieur, Vol C2, 1991.

[71] ERIC PERREAL. T Ecole de technologie supérieure/l'université du Québec/ mémoire présenté à l'école de technologie supérieure comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie de la construction : «*réhabilitation à l'aide de matériaux composites avancés de poutres en béton armé du système Kahn /Montréal octobre 2002* ».

[72] SADONE Raphaëlle, CETE de Lyon, DOA «*Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites*».

[73] Rapport préliminaire de la mission AFPS Organisée avec le concours du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD/DPPR/SDPRM) «*le séisme du 21 mai 2003 en Algérie* » Version du 8 juillet 2003.

- [74] RENARD J. « *Elaboration, microstructure et comportement des matériaux composites à matrice polymère* », Lavoisier, 2005.
- [75] Renforcement des structures par matériaux composites.
- [76] Renforcement de structures Systèmes composites Sika , CarboDur et SikaWrap.
- [77] M. REYNE, « *Technologie des composite* », Edition Hermes, 1995.
- [78] V.S. RUIZ, « *Renforcement d'éléments structuraux en béton armé à l'aide de matériaux composites : analyse fine de la zone d'encrage* », XXI èmes rencontres universitaires de génie civil, Université Blaise Pascal -Clermont, France, 2003.
- [79] Sika, Notices techniques, Edition mai 2006.
- [80] schéma carbone- Renfort par fibre Carbone : « *augmentez les capacités portantes de structures existantes !* ».
- [81] R. WINSTON REVIE « *UHLIG'S Corrosion Handbook Third Edition* » by John Wiley & Sons 2011 p634.
- [82] STRRES (syndicat national des entrepreneurs spécialistes des travaux de réparation et renforcement de structures) : « *Renforcement des structures par matériaux composites en carbone* ».
- [83] Jérôme Stubler , Directeur Général de Freyssinet/ NewsletterNI-01-2012 : « *Chantier de renforcement du pont de Recouvrance à Brest : une technicité surprenante* ».
- [84] Cédric Thomas. « *Etude des mécanismes d'endommagement des composites fibres de carbone / matrice polyamide : application à la réalisation de réservoirs de stockage de gaz sous haute pression de type IV* ». Materials. _Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2011. French. <NNT : 2011ENMP0035>. <pastel-00656807>.
- [85] M TOUHARI " *Influence du renforcement par matériaux Composites de fibres de carbone sur le Comportement d'un pont a poutres en béton*", Mémoire de Magister, ENP, Alger, 2010.
- [86] Prof. Noyan Turkkan / Faculté d'ingénierie, 119 G2 turkkan@umoncton.ca. 506-858-4304 GCIV-5340 Conception des ponts.
- [87] Prof. Noyan Turkkan GCIV-5340 Conception des ponts. Faculté d'ingénierie, 119 G2 turkkan@umoncton.ca/ *Pont à haubans*.
- [88] Université de Sherbrooke GCI 714 - Durabilité et réparations du béton « *action des sulfates, de l'eau de mer et attaque par les acides* ».
- [89] Université de Sherbrooke GCI 714 - Durabilité et réparations du béton « *destruction par écaillage* ».
- [90] Université de Sherbrooke GCI 714 - Durabilité et réparations du béton « *la corrosion* ».

[91] J. Miranda Vizueté : *Techniques et systèmes de renfort des structures en béton*.

[92] www.enseeiht.fr

[93] S. Yamina "Modélisation Numérique Du comportement d'un tablier de pont à Poutres multiples sous chaussée en béton armé renforcé par Matériaux Composites". Mémoire de Magister, Blida, 2008.