



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie



Département de Génie Civil & Architecture

N° d'ordre :/GCA/2020

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTERACADEMIQUE

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structure

Thème

**Renforcement des structures par des matériaux
composites**

Présenté par :

1. BOUFERMA MERIEM
2. BENBIOU NOURA

Soutenu le : 03/ 09 / 2020 devant le jury composé de :

Président : MEHALA TEWFIK

Examineur : BELHOUARI FETHI

Encadreur : SADKI NIZAR

Année Universitaire : 2019 / 2020



REMERCIEMENT

Nous remercions avant tout ALLAH de nous avoir gardés en bonne santé afin de mener à bien ce projet de fin d'étude.

Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont fait pour que nous terminions nos études.

Nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à notre encadreur M. SADKI NIZAR, qui nous a témoigné de sa confiance et de son aide scientifique et par expérience et sa compétence.

Nous remercions tous les enseignants qui ont contribué à notre formation, et aussi tous nos amis pour leur aide, leur patience, leur compréhension et leur encouragement.

Enfin, Mes vifs remerciements sont adressés aux membres de jury, de m'avoir honoré de leur présence et d'avoir voulu évaluer ce travail.

B.MERIEM& B.NOURA

Résumé

Notre thème de mémoire sur le renforcement des structures par des matériaux composites, on a étudiés l'influence de ce renforcement des ouvrages en béton armé sur la résistance des éléments structuraux du béton.

D'abord, on a expliqué les différents types de composites pour le renforcement et leur fabrication et comportement tels que : le renfort et la matrice.

Puis, on a étudiés le renforcement des structures et /ou la réparation et on a cités ses types.

Nous avons approfondi sur l'effet d'adhérence entre armature et béton, c'est-à-dire la liaison acier – béton sans oublier les processus de dégradation pour un chargement statique et cyclique ainsi que, on a présentés les paramètres du comportement de la liaison et l'essai d'arrachement (pull out) entre béton et armature.

Finalement, on a constatés que ces matériaux présentent un bon comportement en compression et en traction et vis-à-vis la durabilité, on peut l'utiliser comme des matériaux de renforcement fiable afin de prolonger la durée de vie des ouvrages en béton armé.

Abstrat

Our thesis topic on the reinforcement of structures with composite materials, we studied the influence of this reinforcement of reinforced concrete structures on the resistance of structural elements of concrete.

First, we explained the different types of composites for reinforcement and their manufacture and behavior such as: reinforcement and matrix.

Then, we studied the strengthening of structures and / or repair and we cited its types.

We studied in depth the effect of adhesion between reinforcement and concrete, that is to say the steel - concrete connection without forgetting the degradation processes for a static and cyclic loading as well as, we presented the parameters of the behavior of the connection and pull out test between concrete and reinforcement.

Finally, we were found that these materials exhibit good compression and tensile behavior and with respect to durability, it can be used as reliable reinforcing materials in order to prolong the life of reinforced concrete structures.

ملخص

موضوع أطروحتنا حول تقوية الهياكل بالمواد المركبة ، درسنا تأثير هذا التعزيز للهياكل الخرسانية المسلحة على مقاومة العناصر الهيكلية للخرسانة. أولاً ، شرحنا الأنواع المختلفة من المواد المركبة للتقوية وتصنيعها وسلوكها مثل: التقوية والمصفوفة.

ثم درسنا تقوية الهياكل و / أو الإصلاح واستشهدنا بأنواعها. لقد درسنا بعمق تأثير الالتصاق بين التسليح و الخرسانة ، أي وصلة الصلب والخرسانة دون أن ننسى عمليات التحلل للتحميل الساكن والدوري ، كما قدمنا معلمات سلوك اختبار الاتصال والسحب بين الخرسانة والتسليح.

أخيراً ، وجدنا أن هذه المواد تظهر سلوكي ضغط و شدّ جيدين وفيما يتعلق بالمتانة ، يمكن استخدامها كمواد تقوية موثوقة من أجل إطالة عمر الهياكل الخرسانية المسلحة.

TABLE DES MATIERES

Résumé	
Table des matières	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des symboles	

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites

I.1: Introduction	04
I.2: LES RENFORTS.....	05
I.2.1 : Fibre de verre.....	05
I.2.2 : Fibre de carbone.....	08
I.2.3 : Fibre d'aramide.....	09
I.3 : LES MATRICES	12
I.4 : TYPES DE COMPOSITES POUR LE RENFORCEMENT	17
I.5 : TECHNIQUES DE FABRICATION DES COMPOSITES	18
I.5.1:Pultrusion.....	19
I.5.2 : Moulage manuel	19
I.5.3 : Enroulement filamentaire.....	20
I.6 : COMPORTEMENT DES COMPOSITES.....	21
I.6.1 :Caractérisations mécaniques d'armatures en PRF	21
I.6.1.1 : Résistance en traction et module élastique	21
I.6.1.2 :Résistance au cisaillement inter laminaire	22
I.6.2 : Fatigue	23
I.7 : CONCLUSION	24

Chapitre II : Fibres en composites pour le renforcement des structures

II.1:Introduction	26
II.2: NATURE DU RENFORCEMENT.....	26
II.2.1: Réparation par projection du béton.....	26
II.2.2:Renforcement par des plaques en acier	27
II.2.3:Renforcement par des plaques en FRP.....	29
II.2.3.1 Renforcement des poteaux.....	29
II.2.3.2: Renforcement des poutres.....	30
II.2.3.3:Renforcement des dalles.....	30
II.2.3.4:Renforcement des murs.....	31
II.2.4: Précontrainte additionnelle.....	31
II.2.5:Renforcement par armatures.....	33
II.2.6 : Renforcement par grille.....	34
II.3 : CONCLUSION	35

Chapitre III : Effet d'adhérence entre armature et béton

III.1: INTRODUCTION.....	37
III.2: ADHERENCE ENTRE BETON ET ARMATURE EN ACIER ET PRF.....	37
III.3: DESCRIPTION DES TEST DE LIAISONS BETON ARME.....	37
III.3.1: Dégradation sous chargement statique.....	37
III.4.2: dégradation sous chargement cyclique.....	39
III.4.2.1: Chargement cyclique de même signe.....	39
III.4: ESSAI D'ARRACHEMENT ENTRE BETON ET ARMATURE.....	41
III.4.1: pull-out test (essai d'arrachement).....	41
III.4.2: tirants soumis à la traction.....	42
III.4.3: les tests de poutres.....	43
III.5:DIFFERENTS TYPES DE RUINES A L'INTERFACE.....	44
III.6: CONCLUSION.....	45
CONCLUSION GENERALE.....	47
REFERENCES.....	48

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : <i>Constituant des matériaux composites</i>	04
Figure I.2: <i>Différents types de fibres</i>	05
Figure I.3 : <i>Fibre en verre</i>	07
Figure I.4 : <i>Fibre en carbone</i>	09
Figure I.5 : <i>Fibre d'aramide</i>	09
Figure I.6 : <i>Différents types de fibres d'aramide</i>	10
Figure I.7: <i>Différents types de matrices</i>	12
Figure I.8 : <i>Schéma de principe du procédé de pultrusion</i>	19
Figures I.9: <i>Moulage par contact</i>	19
Figures I.10: <i>Projection simultanée</i>	20
Figures I.11 : <i>Enroulement filamentaire (ou bobinage)</i>	20
Figure I.12 : <i>Propositions d'ancrages pour essais de tractions sur armatures PRF</i>	22
Figure I.13 : <i>Exemples de dispositifs d'essais Short-beam</i>	23
Figure II.1 : <i>Les deux techniques de projection</i>	27
Figure II.2 : <i>La mise en œuvre des plats collés</i>	28
Figure II.3: <i>Poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites</i>	29
Figure II.4: <i>Poutres en BA renforcées par matériaux composites</i>	30
Figure II.5: <i>Dalle renforcé par matériaux composites</i>	30
Figure II.6 : <i>Renforcement des murs</i>	31
Figure II.7 : <i>Précontrainte Additionnelle</i>	32
Figure II.8 : <i>Renforcement par armatures</i>	33
Figure II.9 : <i>Renforcement par grille</i>	34

Figure III.1 : <i>Courbes contrainte - déformation en compression uni axiale.....</i>	38
Figure III.2 : <i>Courbe cyclique contrainte– déformation.....</i>	39
Figure III.3 : <i>Courbe charge – déplacement.....</i>	40
Figure III.4 : <i>Principe de l’essai Pull-out et exemple de montage d’essai.....</i>	42
Figure III.5 : <i>Test classique de poutre(a), et test du bord de poutre (b).....</i>	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: <i>Caractéristiques mécaniques des fibres de verre.....</i>	<i>06</i>
Tableau I.2: <i>Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone.....</i>	<i>08</i>
Tableau I.3: <i>Caractéristiques mécaniques des différents types de fibres.....</i>	<i>11</i>
Tableau I.4 : <i>Caractéristiques des résines thermodurcissables.....</i>	<i>13</i>
Tableau I.5 : <i>Caractéristiques des résines thermoplastiques.....</i>	<i>15</i>
Tableau I.6: <i>Comparaison des matrices TD et TP.....</i>	<i>16</i>
Tableau I.7 : <i>Exemples de matériaux composites.....</i>	<i>17</i>

Liste des symboles

M_z : moment selon l'axe z
 V_y : effort tranchant l'axe y
 A_c : l'aire de la partie comprimée du béton
 b : largeur de la section
 h : hauteur de la section
 n : coefficient d'homogénéisation
 A_s : Aire de la section d'aciers tendus
 I_c : moment d'inertie de la section du béton
 σ_c : contrainte de compression
 σ_t : contrainte de traction
 EI_c : rigidité à la flexion
 ϵ_{bc} : déformation du béton comprimé
 ϵ_s : déformation de l'acier
 α : la hauteur réduite du béton
 d : hauteur utile de la section
 f_{bc} : Résistance de calcul en flexion
 f_{bu} : résistance ultime à la compression du béton
 f_{cj} : résistance à la compression du béton eu jour j
 θ : un coefficient qui tient compte de la durée d'application des charges.
 γ_b : coefficient de sécurité du béton
 σ_s : contrainte dans les armatures
 f_e : limite élastique de l'acier
 γ_s : coefficient de sécurité de l'acier
 E_s : module d'Young de l'acier
 M_u : moment ultime
 N_{bc} : effort normal de compression dans le béton
 F_{sc} : effort normal de compression dans s aciers
 F_s : effort normal de traction dans les aciers
 A'_s : section des aciers comprimés
 A_s : section des aciers tendus
 Z : bras de levier
 d' : enrobage des aciers comprimés
 V_f : la fraction volumique des fibres
 V_m : la fraction volumique de la matrice
 v_f : volume des fibres
 v_m : volume de la matrice
 v : volume du composite
 ϵ_f : déformation des fibres
 ϵ_m : déformation de la matrice
 ϵ_{frp} : déformation du composite
 P_f : effort dans les fibres
 σ_f : contrainte dans les fibres
 A_f : section des fibres
 E_f : module de Young des fibres
 P_m : effort dans la matrice
 σ_m : contrainte dans la matrice

A_m : section de la matrice
 E_m : module de Young de la matrice
 P_{prf} : effort dans le composite
 σ_{frp} : contrainte dans le composite
 E_{frp} : module de Young du composite
 ν_{LT} : coefficient de poisson longitudinal
 ν_{TL} : coefficient de poisson transversal
 E_T : module de Young transversal
 E_L : module de Young longitudinal
 σ_L : contrainte normale dans le sens longitudinal
 σ_T : contrainte normale dans le sens transversal
 τ_{LT} : contrainte tangentielle
 Q_{ij} : constante de rigidité
 ϵ_L : déformation dans le sens longitudinal
 ϵ_T : déformation dans le sens transversal
 γ_{LT} : déformation en cisaillement
 σ_X : contrainte dans le sens X
 σ_Y : contrainte dans le sens Y
 τ_{XY} : contrainte tangentielle
 $[T]$: matrice de transformation
 Q_{ij} : constante de rigidité réduite
 λ : coefficient définissant la distribution équivalente de la contrainte du béton en compression
 f_{ck} : résistance caractéristique du béton à la compression
 x : hauteur de l'axe neutre
 e_{frp} : épaisseur du composite
 ϵ_0 : déformation initiale dans la fibre tendue
 M_r : moment résistant
 ρ_s : pourcentage des aciers
 ρ_{prf} : Pourcentage du composite
 f_{cc} : résistance en compression du béton
 f_{c0} : résistance en compression du béton confiné
 ϵ_{cc} : déformation du béton
 ϵ_{c0} : déformation du béton confiné
 f_l : pression de confinement
 f_{prf} : Contrainte de rupture à la traction du composite
 t_{prf} : épaisseur du composite
 k_1 : coefficient d'efficacité du composite

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

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

Dans la plupart des cas les frais de la reconstruction sont beaucoup plus importants que la réparation ou le renforcement, ce qui fait que celles-ci seront plus appropriées.

Le renforcement des structures en génie civil a pour but de réparer et de mettre en conformité des structures existantes, soit pour des raisons de pertes de propriétés initiales, pour des raisons de remise à niveau liées à de nouveaux règlements ou de nouveaux usages, soit pour des raisons esthétiques.

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

Dans les années précédentes, la technique la plus utilisée était le collage de plaques métalliques dans les parties les plus sollicitées. Cette technique résout le problème de dégradation des structures par augmentation de la capacité portante des éléments structuraux mais elle présente de sérieux inconvénients dont la corrosion des armatures, la difficulté de maniabilité et l'impossibilité d'ancrer les plaques sur des surfaces irrégulières...

Récemment, des travaux de recherche ont été menés pour remplacer ces plaques d'acier par un matériau non corrosif, plus léger et de haute résistance ; les polymères renforcés de fibres (FRP : fiber reinforced polymers) offrent une alternative préférable. L'utilisation de plaques en matériaux composites augmente les performances des éléments renforcés. Comparativement aux autres techniques de renforcements les PRF présentent les avantages suivants : légèreté, haute résistance, facilité de mise en œuvre, absence de corrosion, possibilité et facilité d'élaboration de formes complexes avec un minimum d'opérations.

L'ingénieur adapte son matériau selon ses besoins par choix judicieux de matrices, fibres et d'orientation de celles-ci.

Ce travail de mémoire a pour objectif le renforcement des structures en béton par des plaques stratifiées composites et l'étude de sa contribution pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques de celles-ci expérimentalement et numériquement.

CHAPITRE I

Généralités sur les matériaux composites

I.1 INTRODUCTION

Le matériau composite est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles et de nature différente, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

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

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans l'industrie automobile, ferroviaire, aéronautique et l'industrie aérospatiale en matériaux à caractéristiques mécaniques élevées associés à un faible poids. Ils sont extrêmement rigides, résistants et légers et leurs performances spécifiques sont supérieures à celles des métaux.

Les matériaux composites structuraux sont principalement constitués de deux phases :

- Le renfort: son rôle est d'assurer la fonction mécanique. Il se présente généralement sous la forme de fibres dont l'orientation au sein du composite dépend de la sollicitation mécanique qu'elle doit supporter.
- La matrice: son but est de réaliser la liaison entre les renforts, leurs protections vis-à-vis des agents agressifs et la prévention contre une rupture catastrophique.

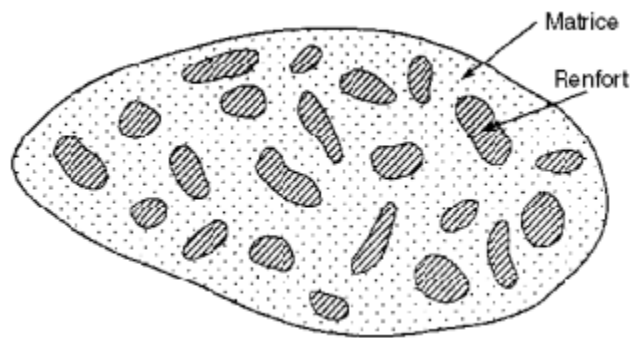


Figure I.1 : *Constituant des matériaux composites.*

I.2 LES RENFORTS

Les principales fibres utilisées pour la fabrication des armatures en PRF sont les fibres de verre, de carbone, d'aramide, ou encore de basalte. Avec des diamètres de l'ordre de la dizaine de μm , leur structure moléculaire est orientée dans le sens longitudinal et présente généralement moins de défauts microstructuraux que le matériau massif, ce qui leur confère de bonnes performances mécaniques. Au cours du processus de fabrication, la fibre reçoit généralement un traitement de surface (dépôt d'ensimage, oxydation,...) afin d'améliorer les caractéristiques générales du renfort et d'optimiser la compatibilité et l'adhérence ultérieure avec la matrice polymère. Nous présentons par la suite les principales fibres permettant de fabriquer les armatures en PRF utilisées en génie civil ; leurs propriétés physiques et mécaniques sont également rapportées dans le Tableau I.3.

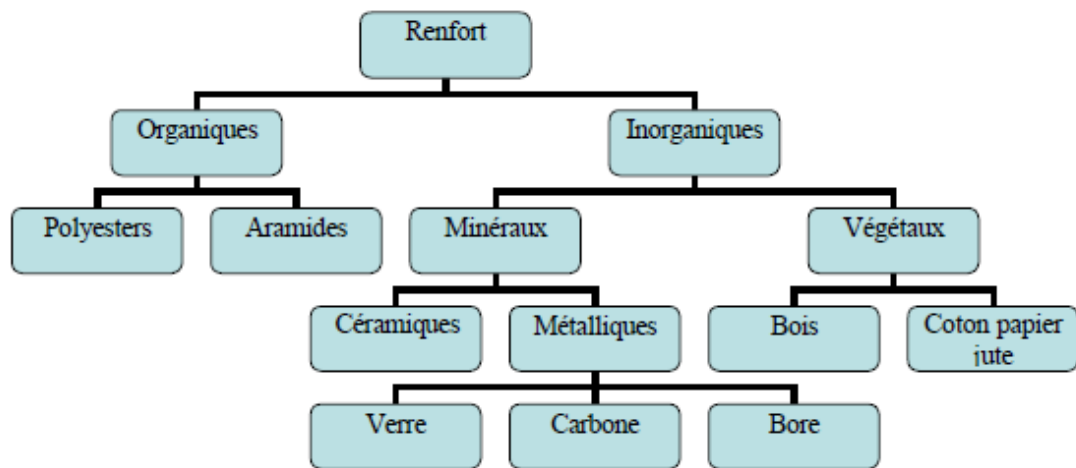


Figure I.2: Différents types de fibres.

I.2.1 Fibres de verre

Formées par un étirement rapide et continu de verre en fusion, les fibres de verre représentent l'écrasante majorité des fibres de renforcement utilisées sur le marché, en raison de leur excellent rapport performance/cout. Ainsi, près de 99 % des pièces composites de grande diffusion sont actuellement fabriquées à partir de fibres de verre. Il existe différents types de fibres avec des compositions verrières spécifiques qui permettent d'améliorer certaines propriétés particulières, comme les résistances mécanique, chimique ou diélectrique . Citons notamment :

Les fibres de verre -E (à usage général, avec de bonnes propriétés électriques), qui sont des borosilicates d'alumine. Leur faible teneur en oxydes de métaux alcalins leur

procure de bonnes propriétés d'isolation électrique. Elles représentent 96 % de la production et se retrouvent dans la majorité des applications industrielles en raison de leur coût modéré .

Les fibres de verre -S ou R (haute résistance mécanique) contiennent des teneurs élevées en silice et en alumine, mais ne comportent ni bore ni alcalins. Elles présentent des propriétés mécaniques supérieures à celles des fibres de verre -E, avec une résistance en traction et un module d'Young respectivement 30 % et 20 % plus élevés.

Caractéristique	Verre type E	Verre type R
Masse volumique (Kg/m²)	2600	2550
Module d'Young E_f (N/mm²)	74000	86000
Contrainte à la rupture (N/mm²)	2500	3200
Allongement à la rupture (%0)	3.5	4

Tableau I.1: *Caractéristiques mécaniques des fibres de verre.*

Elles sont également plus coûteuses , ce qui restreint leur usage à des applications à hautes performances dans l'industrie de l'armement ou l'aéronautique.

Les fibres de verre-AR comportent des teneurs élevées en oxyde de zirconium (ZrO₂) et en soude, qui leur confèrent une bonne résistance chimique en milieu alcalin. Elles peuvent être utilisées pour le renforcement du ciment mais restent peu présentes dans les PRF en raison de leur moindre compatibilité avec les matrices polymères usuelles .



Figure I.3 : *Fibre en verre.*

Les fibres de verre destinées à la fabrication de composites à matrice organique sont toujours recouvertes d'un ensimage plastique qui permet de faciliter la mise en œuvre et d'optimiser les propriétés finales du composite. Il s'agit d'une émulsion aqueuse contenant notamment des agents filmogènes collants (souvent un polymère du même type que la matrice envisagée de manière à faciliter l'imprégnation), des agents lubrifiants, et des agents de pontages (le plus souvent des organosilanes) qui assurent la liaison chimique entre le verre et la matrice et améliorent la tenue au vieillissement hydrolytique .

De manière générale, les propriétés physiques et mécaniques du verre sont considérées comme étant isotropes. Les fibres de verre, possèdent également une haute résistance thermique et d'excellentes propriétés d'isolation électrique. Leur principal point faible réside dans leur sensibilité à l'humidité et aux alcalins (pour les fibres autres que AR).

I.2.2 Fibres de carbone

Les fibres de carbone sont majoritairement produites par pyrolyse (décomposition thermique à haute température) d'un précurseur organique, le poly acrylonitrile (PAN). Après un premier traitement d'oxydation du PAN vers 400 °C, la fibre subit ensuite un traitement de carbonisation entre 1000 et 1500 °C sous atmosphère inerte, et éventuellement un traitement complémentaire de graphitisation entre 2500 et 3000 °C. Ainsi, la carbonisation conduit à l'obtention de fibres Haute Résistance (HR) tandis que la graphitisation permet de produire des fibres Haut Module (HM) ayant une structure plus compacte et ordonnée, proche de celle du graphite (pureté en carbone de l'ordre de 99 %) . ses caractérisés de type fibre carbone dans ce tableau.

Caractéristique	Carbone HM	Carbone HR
Masse volumique (Kg/m ²)	1800	1750
Module d'Young Ef (N/mm ²)	390 000	230 000
Contrainte à la rupture (N/mm ²)	2 500	3 200
Allongement à la rupture (%0)	0.6	1.3

Tableau I.2: *Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone.*

Globalement, les fibres de carbone sont caractérisées par leur faible densité, une rigidité bien plus élevée que celle des fibres de verre, une résistance élevée à la traction, une bonne tenue en température (à plus de 2500 °C en milieu inerte), une bonne conductivité électrique et thermique, un faible coefficient de dilatation thermique, et une inertie chimique notamment vis-à-vis de l'humidité et des bases (en milieu non oxydant). Les principales propriétés physiques et mécaniques des fibres HR et HM sont répertoriées dans le Tableau I.2. En raison de leur orientation et de la structure carbonée sous forme de feuillets, ces fibres présentent une forte anisotropie, avec des propriétés très différentes dans les directions longitudinales et transverses. La surface des fibres de carbone étant chimiquement peu réactive, elles présentent naturellement une faible compatibilité avec les résines thermodurcissables usuelles.

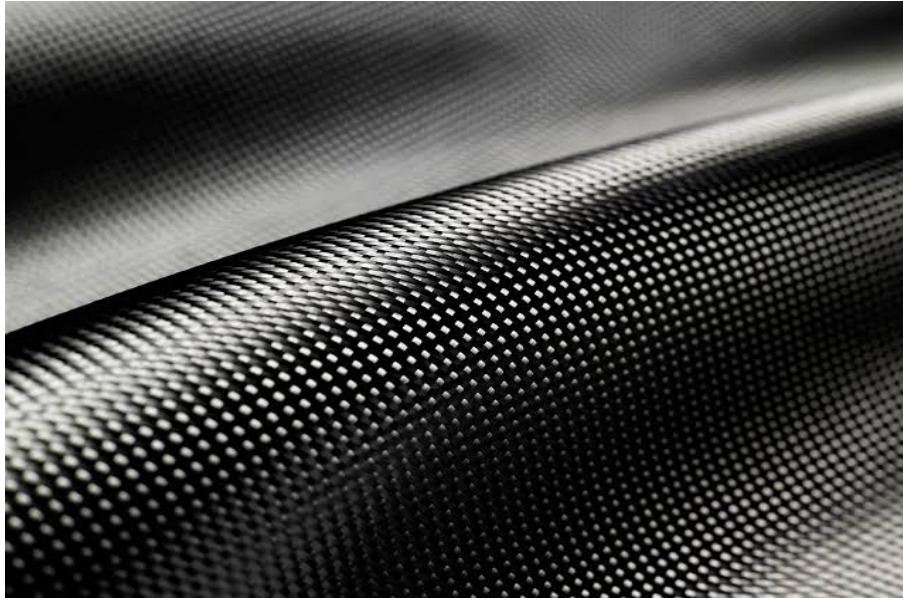


Figure I.4 : *Fibre en carbone.*

La plupart des fabricants réalisent donc un traitement de surface par oxydation électrolytique qui permet de créer des sites fonctionnels polaires de surface (groupe hydroxyles OH, carbonyles CO ou carboxyles COOH), et déposent également des ensimages dont les constituants sont compatibles avec les résines d'imprégnation. Ces traitements vont favoriser l'adhérence fibre/matrice et jouer un rôle important sur la résistance au cisaillement inter-laminaire des composites .
Ces fibres très performantes sont également plus coûteuses que les fibres de verre.

I.2.3 Fibres d'aramide

Le terme aramide est le qualificatif donné aux fibres synthétiques constituées d'une chaîne polyamide dans laquelle au moins 85 % des groupements amides (-NH-CO-) sont directement liés à deux noyaux benzéniques . Ce sont donc des polyamides aromatiques dotés d'une structure cristalline très rigide. Il existe plusieurs types de fibres aramides dans le commerce, qui se distinguent notamment par la position des groupes fonctionnels sur les noyaux aromatiques (Figure I.6).

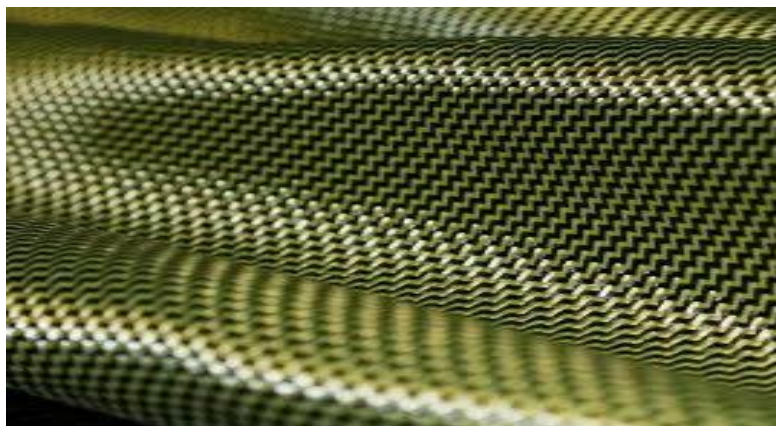


Figure I.5 : *Fibre d'aramide.*

En ce qui concerne les para-aramides et copolymères, le procédé de fabrication de base conduit à l'obtention de fibres à bas module. Une étape supplémentaire d'étirage à chaud permet d'orienter fortement la structure cristalline et d'obtenir des fibres à haut module. Ce sont essentiellement ces fibres haut-module qui sont utilisées pour le renforcement de matériaux composites, les autres étant plutôt destinées à des applications textiles, câble ou pour la protection balistique.

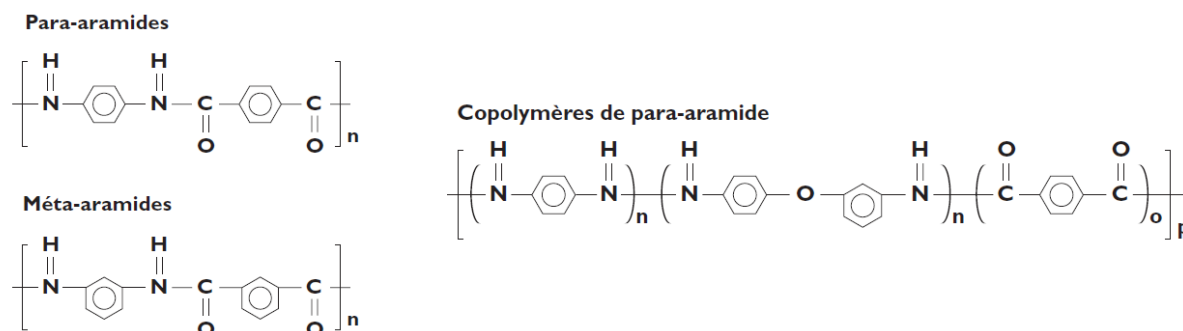


Figure I.6 : Différents types de fibres d'aramide.

Les principales propriétés des fibres para-aramides de haut module sont regroupées dans le Tableau 1.1. Ces fibres sont caractérisées par une faible densité, une bonne résistance en traction, une rigidité intermédiaire à celle des fibres de verre et de carbone, une résistance en température jusqu'à 300 °C, un comportement auto-extinguible, et des coefficients de dilatation thermique très différents dans les sens longitudinal et transversal.

Leurs principaux inconvénients résident dans leur sensibilité au rayonnement UV, leur reprise d'humidité importante (pouvant atteindre 3 % en masse dans les conditions standard), leurs performances médiocres en compression, et une difficulté pour la découpe et l'usinage. En outre, ces fibres aramides, particulièrement résistantes à l'abrasion, peuvent présenter de mauvaises propriétés d'adhérence avec certaines matrices polymères malgré l'utilisation d'ensimages.

Les principales propriétés des fibres précédemment citées sont regroupées dans le Tableau I.3.

	Renforts	Verre E	Verre R	Carbone HM	Carbone HR	Kevlar 49
Diamètre du filament (µm)	D	16	10	6.5	7	12
Masse volumique (kg)	Mv	2600	2500	1800	1750	1450
Module d'élasticité longitudinal (N/mm²)	E	74 000	86 000	390 000	230 000	130 000
Module de cisaillement (N/mm²)	G	30 000	25 000	20 000	50 000	12 000
Coefficient de poisson	K	0.25	0.20	0.35	0.30	0.40
Contrainte de rupture (traction) (N/mm²)	G	2500	3200	2500	3200	2900
Allongement à la rupture (%)	A	3.50	4	0.60	1.30	2.30
Coefficient de dilatation thermique	U	0.5° 10	0.3°10	0.08°10	0.02°10	0.2°10

Tableau I.3: *Caractéristiques mécaniques des différents types de fibres.*

I.3 LES MATRICES

La matrice est composée d'une résine (polyester, époxyde, etc.) et de charge à pour rôle de:

- Lier les fibres de renforts,
- Répartir les contraintes,
- Donner la forme désirée au produit final.

L'ensemble résine-charge se comporte comme un matériau homogène, et le composite est considéré comme constitué d'une matrice et d'un renfort. La matrice a pour but de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures.

Le type d'association matrice –renfort dépend des contraintes imposées au concepteur: caractéristiques mécaniques élevées, tenue en température, cout, résistance à la corrosion ,etc.

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent êtres atteintes. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure I.7.

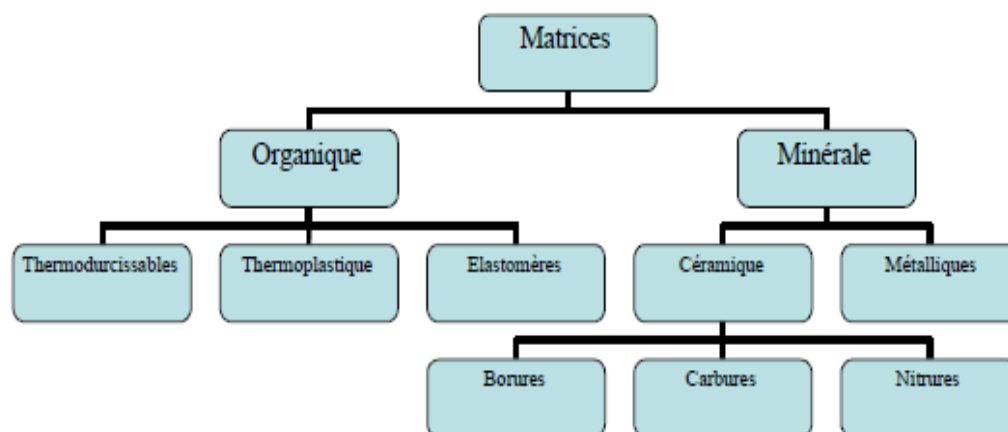


Figure I.7: Différents types de matrices.

I.3.1 Les résines

Les résines sont des polymères modifiés par différents additifs et adjuvants. Les résines sont livrées sous formes de solutions, sous forme de polymères non réticulés en suspension dans des solvants qui empêchent le pontage entre les macromolécules pré polymérisées. Sous l'action de la chaleur, des liaisons se développent entre les chaînes de pré polymère pour constituer un polymère réticulé suivant une structure tridimensionnelle.

Deux grandes familles de résines existent : les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques.

I.3.1.1 Les résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. En effet après polymérisation par apport de chaleur, ces résines développent une structure géométrique qui ne peut être détruite que par un apport très important d'énergie d'où leur propriétés mécaniques et thermomécaniques très élevées par rapport aux résines thermoplastiques.

Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau I-4.

Résines	Tf (°C)	P (kg/m ³)	ϵ_{Rt} (%)	σ_{Rt} (MPa)	σ_{Rc} (MPa)	E (GPa)
Polyesters	65 à 100	1 140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
Phénoliques	120	1 200	2,5	40	250	3 à 5
Epoxydes	290	1 100 à 1 500	2 à 2,5	60 à 80	250	3 à 5

Tableau I.4 : *Caractéristiques des résines thermodurcissables.*

Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la composition des matériaux composites sont :

a) Les résines Polyesters non saturés :

C'est la résine la plus utilisée dans les composites de grande application. Elles passent successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état solide infusible. La réaction du durcissement dépend de la réactivité de la résine, et de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.).

Suivant leur module d'élasticité, les résines polyesters sont classés en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont de type rigide,

Leurs avantages sont :

- Une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevée.
- Une bonne stabilité dimensionnelle.
- Une facilité de mise en œuvre.
- Un faible coût de production.
- Une bonne tenue chimique.
- Une bonne résistance chimique aux hydrocarbures (essence, fuel, etc.).

Et leurs inconvénients sont :

- Emission d'éléments polluants
- Inflammabilité.
- Une dégradation à la lumière par des rayons ultraviolets.
- Une mauvaise tenue à la vapeur.

b) Epoxydes

Ce sont les plus utilisés après les résines polyesters insaturées, du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, ces résines époxydes sont généralement utilisés sans charges ou additifs, ce sont des matrices de composites à haute performance (la construction aérospace, missiles, etc....).

Toutefois pour bénéficier réellement de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de cuisson très longues, correspondant à des températures relativement élevées de l'ordre de 100°C.

Ses avantages sont :

- Une adhérence parfaite sur les fibres.
- Une bonne propriété mécanique (en traction, flexion, compression, choc, et fluage, etc.), supérieure à celles des polyesters.
- Une mise en œuvre facile, sans apport de solvant.
- Une bonne tenue thermique, chimique et à la fatigue.

Ses inconvénients :

- Coût élevé.
- Temps de polymérisation long.
- Vieillesse sous température.
- Sensibilité à l'humidité et aux rayons ultra-violet.
- Nécessite de prendre des précautions lors de la mise en œuvre.

I.3.1.2 Les résines thermoplastiques :

Les résines thermoplastiques possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme plusieurs fois par chauffage et refroidissement successifs, elles peuvent donc être récupérées et facilement recyclées.

La structure de ces résines à la forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour mettre en forme (les chaînes se plient) et les refroidir pour les fixer.

Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible : ces dernières sont présentées dans le tableau I.5

Résines	Tf (°C)	ρ (kg/m ³)	ϵ_{Rt} (%)	σ_{Rt} (MPa)	σ_{Rc} (MPa)	E (GPa)
Polyamide	65 à 100	1 140		60 à 85		1,2 à 2,5
Polypropylène	900	1 200		20 à 35		1,1 à 1,4

Tableau I.5 : *Caractéristiques des résines thermoplastiques.*

Les principales résines thermoplastiques utilisées sont les suivantes :

- **Polyamide** : une bonne tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.
- **Poly téréphtalate éthylénique et butylique** : bonne rigidité.
- **Polycarbonate** : une bonne tenue au choc.
- **Polysulfures de phényle**: une résistance à l'hydrolyse.
- **Polyoxyméthylènes** : une bonne tenue à la fatigue.
- **Polysulfures**: une bonne stabilité chimique.
- **Polypropylène** : assez stable en température, mais combustible.

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

• *Comparaison*

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

Tableau I.6: *Comparaison des matrices TD et TP.*

I.4 TYPES DE COMPOSITES POUR LE RENFORCEMENT

Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au tableau I.7. Dans un sens plus restrictif, un matériau composite utilisé dans la réparation des structures est par définition, toute matière première comportant un renfort et une matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison.

Le renfort assure la résistance et la rigidité du matériau, la matrice maintient les éléments de renfort dans leurs dispositions, assure le transfert des charges au renfort et donne au matériau sa forme désirée.

Le renfort peut être sous forme de fibres ou de particules, on ne traitera dans ce travail que ce qui concerne les matériaux à base de fibres.

Les principaux constituants des matériaux composites reçoivent des additifs ou charges pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice.

Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au tableau I.7.

Type de composite	Constituants	Domaine d'application
1/Composites matrice organique - papier -carton	-Résine/fibre cellulosique -Résine /copeaux -Résine / tissus -Elastomère	-Imprimerie -bâtiment -toitures -Automobile
2/composites à matrice minérale -bidon -Composite -carbone	Ciment /sable /granulats Carbone / fibres	-Génie civil -aviation -espace
3/ Composites à matrice métallique	Aluminium /fibres de bore Aluminium /fibres de carbone	-aérospatial

Tableau I.7: Exemples de matériaux composites.

I.5 TECHNIQUES DE FABRICATION DES COMPOSITES

La possibilité d'utiliser plusieurs procédés de fabrication ainsi que divers matériaux fait que les FRP sont des produits polyvalents et faciles à produire. On présente dans cette section un survol des différentes méthodes de fabrication, Les procédés les plus importants sont :

- pultrusion
- Moulage manuel
- Enroulement filamentaire (ou bobinage).

I.5.1 Pultrusion

Les armatures en PRF sont pour la plupart fabriquées par pultrusion. Il s'agit d'un procédé de fabrication en continu, dont le principe est décrit sur la Figure I.8, et qui permet d'obtenir des profilés au kilomètre. Les mèches de fibres sont tirées en continu et passent à travers des modules exécutant différentes opérations. Elles sont tout d'abord imprégnées dans un bain de résine thermo-régulé, puis guidées à travers une filière de section donnée, qui confère sa forme au profilé (section circulaire dans le cas des barres de renforcement utilisées en construction). Le profilé passe ensuite à travers un four où il subit un cycle de cuisson optimisé pour achever la polymérisation de la matrice, puis est finalement coupé à la longueur désirée en sortie de chaîne.

Une dernière étape consiste à effectuer un traitement de surface sur le jonc, afin d'optimiser ses propriétés d'adhérence. Selon le fabricant, ce traitement peut consister à appliquer un revêtement contenant des particules de sable, ou à créer un relief de surface par usinage ou par ajout de matière. La configuration géométrique de ces reliefs peut être très variée (circulaires, spirales, ...). Selon le choix retenu, chaque armature possèdera donc des propriétés d'adhérence spécifiques en milieu béton. De manière générale, les armatures PRF fabriquées par pultrusion présentent une orientation unidirectionnelle des fibres, ainsi qu'un taux de renfort élevé (de 45 à 70 % en volume, ou 60 à 80 % en masse). Le procédé conduit également à un taux de compaction élevée de la matière, ce qui limite la teneur en défaut (vides, déamination). Ces éléments permettent d'atteindre des performances mécaniques et des niveaux de qualité élevés.

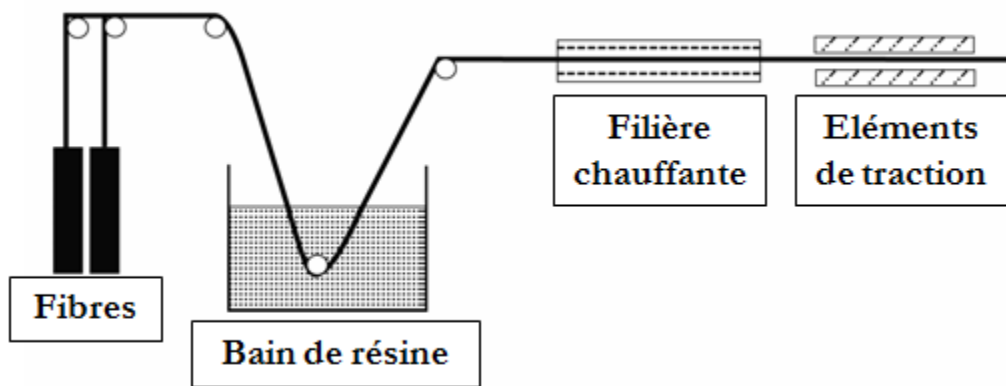
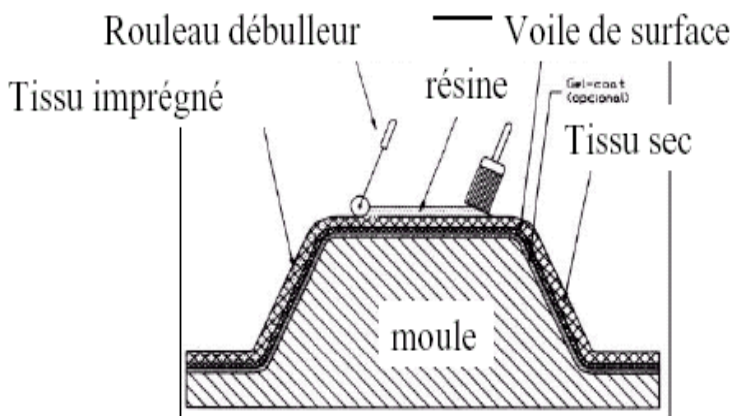


Figure I.8 : Schéma de principe du procédé de pultrusion

I.5.2 Moulage manuel

a) Moulage au contact

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée



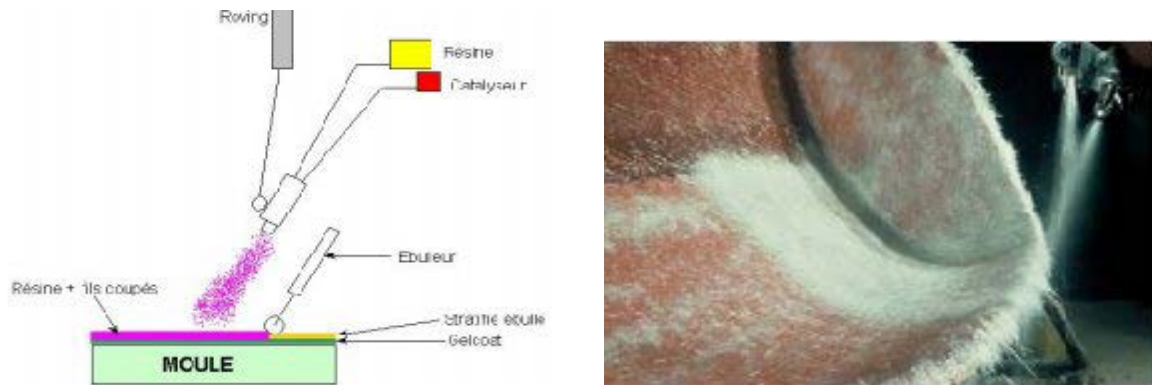
Figures I.9: Moulage par contact.

• Matières premières

- Renforts : mats, tissus de fibre de verre, de carbone ou d'aramide (taux de renfort volumique allant jusqu'à 35 % dans le cas du verre).
- Résines : polyesters, époxy, phénoliques, vinylites.
- Divers : catalyseur, accélérateur, charges, pigments, agent de démoulage, acétone.

b) Moulage par projection simultanée

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifié et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et éboulée au rouleau cannelé. Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient.



Figures I.10: Projection simultanée.

• Matières premières

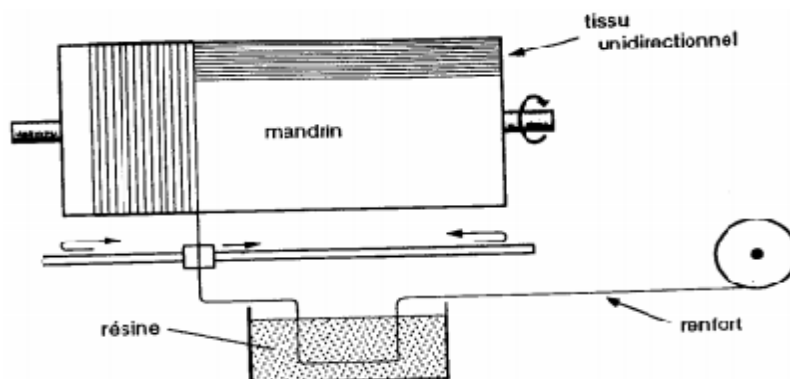
Renfort : fibre de verre sous forme de roving assemblés, taux de renfort de 25 à 35 % en volume.

Résines : principalement polyesters mais aussi phénoliques ou hybrides

Divers : catalyseurs, accélérateur, pigments, charges, agent de démoulage, solvant

I.5.3 Enroulement filamentaire (ou bobinage)

Procédé de moulage limité aux formes de révolution. Initialement, destiné à la réalisation d'enveloppes de révolution nécessitant de hautes performances mécaniques par enroulement progressif sur un mandrin, selon un angle déterminé de fils de verre imprégnés de résine. Par la suite, le procédé a été étendu à des structures moins performantes en associant aux rovings bobinés d'autres types de renfort (fils coupés, mat, tissu) appliqués de façon adaptée.



Figures I.11: Enroulement filamentaire (ou bobinage).

I.6 COMPORTEMENT DES COMPOSITES

L'adhérence entre l'armature et le béton est un point clé dans le comportement mécanique d'une structure en béton armé. Les propriétés d'interface jouent un rôle critique dans le transfert de charge entre le béton et son renfort. Ces caractéristiques se répercutent à l'échelle de la structure, notamment sur les déformations en service (flèches), ainsi par exemple que sur la fissuration du béton d'enrobage. Le transfert de charges entre la barre en PRF et le béton est la résultante de plusieurs mécanismes:

- l'adhésion chimique entre la barre et le béton
- le confinement de la barre induit par le retrait du béton
- les forces de friction dues aux rugosités de l'interface et au glissement relatif entre la barre et le béton environnant
- l'effet d'engrènement mécanique lié à la présence de reliefs entre la barre et le béton.

Il est difficile de déterminer les contributions de ces différents mécanismes sur le comportement mécanique global de l'interface. C'est donc ce dernier qui est en général étudié.

I.6.1 Caractérisations mécaniques d'armatures en PRF

I.6.1.1 Résistance en traction et module élastique

Les essais de traction sur armatures composites sont décrits par les normes D 7205/D 7205M et ASTM D 3916. La procédure est également reprise par le guide ACI 440.3R. La principale spécificité réside dans le dispositif d'ancrage des éprouvettes. Il n'est pas possible dans le cas d'armatures en PRF d'utiliser le même type d'ancrage que pour des armatures en acier. En effet, les armatures en PRF nécessitent un dispositif d'ancrage spécifique, généralement constitué d'un tube en acier scellé autour de chaque extrémité de la barre, au moyen d'une résine de scellement ou d'un mortier expansif.

Ces ancrages permettent de répartir de manière plus uniforme les contraintes radiales dans l'armature et ainsi d'éviter une rupture prématurée par compression au niveau des zones de serrage. Un exemple d'ancrage pour PRF est illustré sur la Figure I.12.

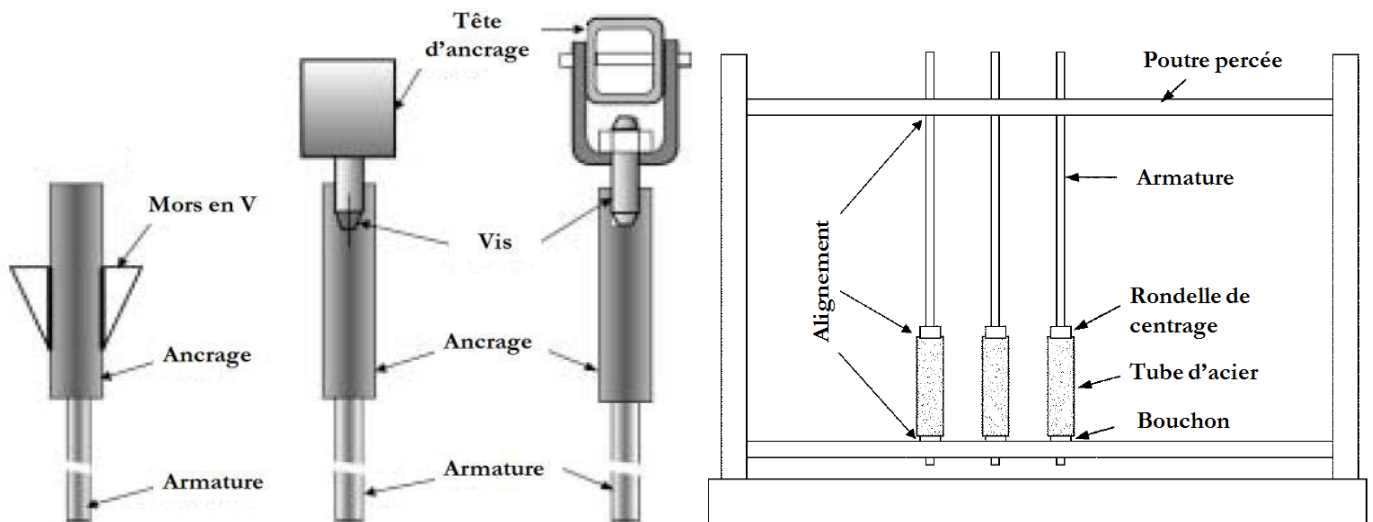


Figure I.12 : Propositions d'ancrages pour essais de tractions sur armatures PRF.

I.6.1.2 Résistance au cisaillement inter laminaire

La norme ASTM D4475 définit un essai de flexion trois points avec appuis rapprochés, appelé essai *Short-beam*, afin d'évaluer la résistance au cisaillement inter-laminaire de l'interface fibre/matrice. Cette configuration de flexion trois points avec appuis rapprochés (portée égale à quelques diamètres d'armature) induit un effort tranchant prédominant sur le moment de flexion. Le cisaillement est ici dit inter-laminaire car l'effort tranchant est appliqué perpendiculairement à l'interface fibre/matrice. La norme spécifie l'utilisation d'appuis spécifiques qui permettent de mieux répartir les efforts sur la barre.

La Figure I.13 représente des exemples de dispositifs d'essais *Short-beam* présentés dans la littérature. Notons que dans la plupart des cas, les essais *Short-beam* ont été utilisés dans le cadre d'études de durabilité. Dans les articles cités, seules les résistances résiduelles des barres en PRF (exprimées en % de la résistance initiale) sont indiquées à l'issue de vieillissements dans différentes conditions environnementales. Ces études de vieillissement seront présentées ultérieurement dans cette étude bibliographique.

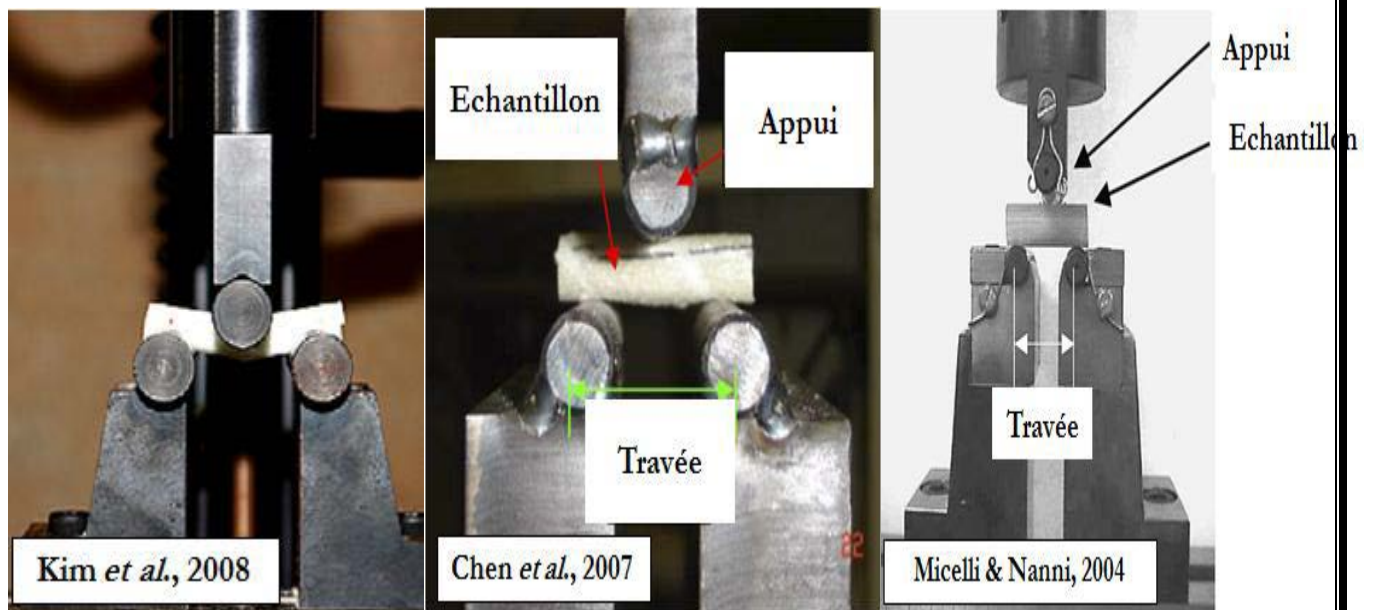


Figure I.13 : Exemples de dispositifs d'essais Short-beam .

I.6.2 Fatigue

Toute structure du génie civil est soumise au cours de sa vie à une part de sollicitation dite cyclique ou de fatigue, pouvant résulter du trafic, de vibrations (action du vent par exemple), ou encore de cycles thermiques ou hygrométriques. Les armatures en PRF, comme tout matériau peuvent donc subir des dégradations induites par la fatigue. Comparativement aux métaux, les PRF démontrent généralement une faible sensibilité à l'effet d'entaille sous sollicitation de traction cyclique. Leur performance vis-à-vis des cycles de compression est par contre souvent jugée inférieure à celle des métaux. Le comportement en fatigue d'armatures en PRF peut dépendre des performances des fibres, de la matrice des interactions fibres/matrices, ainsi que d'effets environnementaux comme la température ou des environnements agressifs. On considère généralement que les matrices vinyles et époxy présentent de bonnes performances vis-à-vis de la fatigue. Les PRF à base de fibres de carbone démontrent une résistance à la fatigue remarquable qui est attribuée au haut module d'élasticité des fibres. En effet, plus la fibre s'allonge, plus la matrice, obligée de suivre, se déforme en générant des décohésions aux interfaces . En pratique, les tests de fatigue sur barres en PRF sont réalisés sous sollicitations cycliques en configuration de traction directe.

I.7 CONCLUSION

Nous avons vu dans ce chapitre une bibliographie générale sur les matériaux composites.

Dans un premier temps, nous avons présenté le classement des matériaux composites et leurs constitutions, les différents modes d'architecture et les méthodes de fabrication ainsi que les propriétés mécaniques des composites et leur performances pour le renforcement des structures.

CHAPITRE II

Fibres en composites pour le renforcement des structures

II.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales techniques pour la réparation et de renforcement en béton armé qui peuvent être effectués soit par ajout de forces (cas de la précontrainte additionnelle), soit par ajout de matières (béton projeté et renfort collés), ceci est en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, la tenue aux sollicitations plus élevées que celles prévues à l'origine et tenant compte des critères économiques de matériaux de construction et des techniques choisies.

II.2 NATURE DU RENFORCEMENT

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier (augmentation de la ductilité, de la résistance) d'une construction pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre des sollicitations dont il n'a pas été tenu compte dans les calculs. Un renforcement peut être associé à une réparation.

II.2.1 Réparation par projection du béton

Le béton projeté est un béton mis en œuvre par refoulement dans une conduite et projeté sur une paroi par un jet d'air comprimé. Cette technique de réparation était très couramment employée car particulièrement bien adaptée à la réparation des voûtes et tunnels ou des murs en béton armé. Elle permet de réaliser aussi bien des réparations superficielles, comme la réparation d'un parement en béton présentant de légères épaufrures, que des réparations ou des renforcements de structures, en disposant de nouvelles armatures à la structure. Dans ce cas, le béton reconstitue non seulement la géométrie de la construction mais aussi, il joue également le rôle confié au béton dans l'association acier / béton armé. Les étapes importantes avant la projection du béton sont la mise en état du support (sablage, brossage des armatures,...), la mise en disposition et l'ancrage des armatures ajoutées et enfin la mise en place des coffrages.

Il existe deux techniques de projection, qui se distinguent essentiellement par le moment d'introduction de l'eau de gâchage :

-**Technique par voie sèche:** introduction lors de la projection du béton

-**Technique par voie mouillée:** introduction lors du malaxage en centrale à béton.

La technique par voie sèche est plus utilisée en réparation qu'en travaux neufs. Elle s'applique à des chantiers de petite taille ou nécessitant des arrêts fréquents. La voie mouillée est généralement réservée à des chantiers nécessitant des rendements importants.

Au niveau de l'entrée de la lance, fixée à l'extrémité du tuyau d'approvisionnement du Béton, aboutissent les autres tuyaux d'approvisionnement :

- En eau et éventuellement en adjuvant, dans le cas de la voie sèche,
- En adjuvant et en air comprimé, dans le cas de la voie mouillée à flux dense.

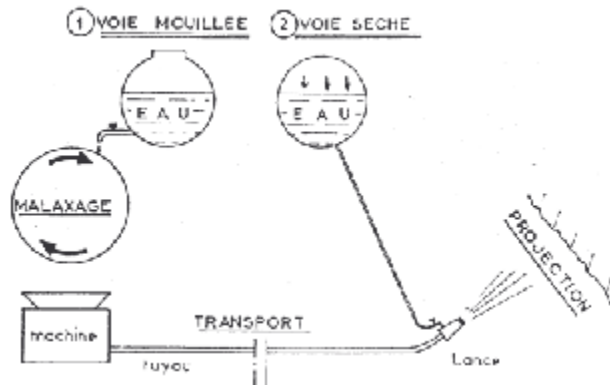


Figure II.1 : Les deux techniques de projection.

•Avantage :

- *Permet de s'affranchir de la manutention pénible de coffrages lourds et encombrants.
- *Simplicité de mise en œuvre par rapport aux solutions coffrées.
- *Rapidité de mise en œuvre. Sécurité améliorée de la tenue des parois.
- *Adaptabilité du béton à la forme des supports.

II.2.2 Renforcement par des plaques en acier

L'utilisation de plaques d'acier collées afin de renforcer des insuffisances locales ou globales s'est développée ces dernières années. C'est une technique économique qui modifie peu l'aspect et les dimensions de la structure à réparer.

Ces plaques sont généralement facilement inspectables pour faire le suivi des dégradations. Le collage de la plaque à la surface du béton assure un bon transfert des efforts et permet ainsi une augmentation de la résistance et de la raideur de la structure renforcée.

Les plaques d'acier collées peuvent être utilisées afin d'effectuer un renforcement en flexion, en cisaillement ou pour confiner des colonnes en béton.

•Les matériaux utilisés

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

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

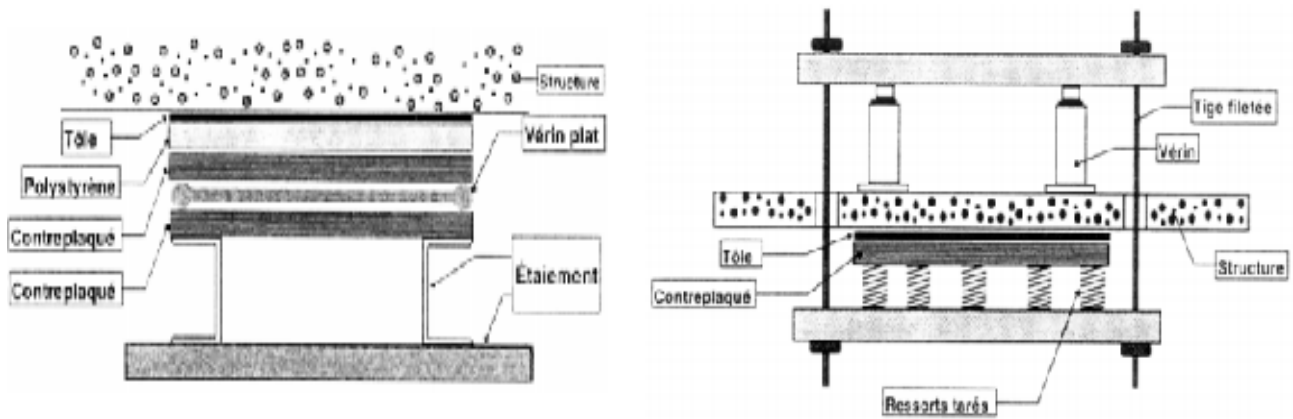


Figure II.2 : La mise en œuvre des plats collés.

Les problèmes rencontrés peuvent être classés selon trois types : Les problèmes de minéen oeuvrent, les problèmes de durabilité et les problèmes de comportement mécanique. La lourdeur de la mise en œuvre nécessitant des moyens de manutention important et une préparation des plaques d'acier en usine. Une mise en œuvre sur des surfaces non droites est difficile.

Des problèmes de corrosion sont souvent rencontrés lorsque la protection des plaques d'acier est déficiente. Dans le cas du renforcement de poutres dépôts, l'expérience [Calgaro et Lacroix, 1997] a montré que les plaques d'acier collées résistaient mal au choc (véhicules hors gabarit). Theil out indique quatre problèmes mécaniques lors de l'utilisation de plaques collées extérieures au béton :

- La mise en flexion locale de la plaque au voisinage d'une fissure;
- La répartition des efforts dans l'empilement de plusieurs plaques d'acier;
- La distribution des déformations entre les aciers internes et les aciers collés;
- Le décollement de la plaque.

Des travaux de recherche ont été entrepris pour remplacer ces plaques d'acier par un Matériau non corrosif, léger et de haute résistance. Ceux-ci ont été si concluants que les matériaux composite renforcés de fibres (appelé FRP d'après la traduction anglaise « fiber reinforced plastics ») sont en voie d'être considérés comme une alternative préférable aux plaques d'acier pour le renforcement externe de certaines membrures en béton armé.

II.2.3 Renforcement par des plaques en FRP

II.2.3.1 Renforcement des poteaux

L'utilisation d'une enveloppe formée de feuilles de FRP autour de la colonne permet non seulement d'assurer une protection supplémentaire, mais aussi d'améliorer la résistance en compression par l'effet du confinement produit par les fibres du composite en plus d'une augmentation de ductilité très significative comparativement à la colonne sans composite.



Figure II.3: *Poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites.*

II.2.3.2 Renforcement des poutres

On peut effectuer un renforcement en flexion en collant les bandes sur la surface tendue de la poutre, et le renforcement en cisaillement peut être apporté par le collage des bandes sur les parois de ces mêmes poutres.



Figure II.4: *Poutres en BA renforcées par matériaux composites.*

II.2.3.3 Renforcement des dalles

L'utilisation de composites en bandes peut aussi améliorer la résistance en flexion de dalle en béton armé.



Figure II.5: *Dalle renforcé par matériaux composites.*

II.2.3.4 Renforcement des murs

Seulement quelques cas d'application de matériaux composites destinés au renforcement de murs ont été publiés. Le plus documenté d'entre eux concerne un immeuble à appartement de six étages à Zurich, en Suisse (Steiner, 1996). Étant donné que le bâtiment a été construit en 1930 et converti en bâtiment à bureau avec certaines modifications au niveau de son système de résistance latérale, le système structural a donc été réévalué. Parmi ces changements, des murs en maçonnerie non renforcée conçus pour les charges sismiques ont été enlevés, et ceux restant devaient prendre une charge beaucoup plus grande. L'utilisation des matériaux composites s'avérait donc très utile. On a collé des plaques de fibres de carbone en forme de X pour chacun des étages. Un système d'ancrage avec des tiges d'acier a servi pour améliorer l'adhésion entre les fibres et le mur. Avec les composites, la ductilité du mur a été augmentée à un coût relativement faible et dans des délais très raisonnables.



Figure II.6 : *Renforcement des murs*

II.2.4 Précontrainte additionnelle

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés graissés généralement disposés à l'extérieur du béton. La précontrainte additionnelle va introduire dans la structure des sollicitations complémentaires, qui vont compenser les défauts de dimensionnement ou de conception ou des efforts supplémentaires, que doit supporter la structure suite à des modifications des conditions de chargement ou d'utilisation.

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

Cette technique permet :

-Soit d'améliorer la pérennité des ouvrages ;

-Soit de renforcer des ouvrages en béton (en particulier des ouvrages en béton précontraint dont les câbles présentent des problèmes de corrosion ou de ruptures de torons ou d'ancrages ou qui ont fait l'objet lors de leur dimensionnement déprise 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 ou de convois exceptionnels).

Elle peut s'appliquer à tous types de structures existantes en béton armé ou en béton précontraint. La précontrainte extérieure est le plus souvent constituée de câbles fixés à des bossages ancrés à la structure par des barres de précontrainte. Les câbles sont protégés par une gaine en polyéthylène injectée à la cire pétrolière. La technique des torons graissés est beaucoup plus simple d'utilisation car elle permet la mise en tension toron par toron à l'aide de petits vérins.

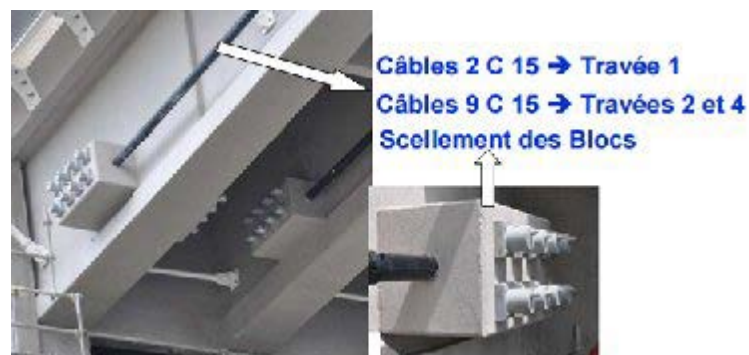


Figure II.7 : *Précontrainte Additionnelle.*

Le tracé des armatures de précontrainte additionnelle peut être rectiligne ou polygonal. Un câblage rectiligne est plus pratiques et aussi facile à le mettre en œuvre et les pertes d'effort par effet de frottement sont localisées au voisinage des zones d'ancrages, et sont de faibles estimations Par contre le tracé polygonal qui consiste à dévier les câbles, de façon à optimiser l'effet de la précontrainte tant sur le plan de la résistance en flexion que sur celui de la résistance à l'effort tranchant.

Les pertes par frottement sont un peu plus fortes que dans le cas d'un tracé rectiligne, tout en restant modérées, et la mise en œuvre est plus compliquée, à cause de la confection des déviateurs, mais c'est la conception la plus courante .

II.2.5 Renforcement par armatures

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

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



Figure II.8 : *Renforcement par armatures.*

II.2.6 Renforcement par grille

Nous étudions dans ce projet l'incidence que peut avoir la qualité de la résine de protection de la fibre de verre. Ainsi toutes les grilles ont une ouverture de maille de 40mm x 40 mm entraxe et sont associées à un même léger non-tissé de polyester. Deux types de résistances mécaniques (50 et 100 K N/m à la rupture) et deux types de résines sont retenus. L'influence de ces paramètres sur l'endommagement à la mise en œuvre, la qualité du collage et en final l'apport structurel sera étudiée. Ces grilles ont comme référence une grille qui a fait ses preuves et qui est utilisée depuis plus de 10ans.

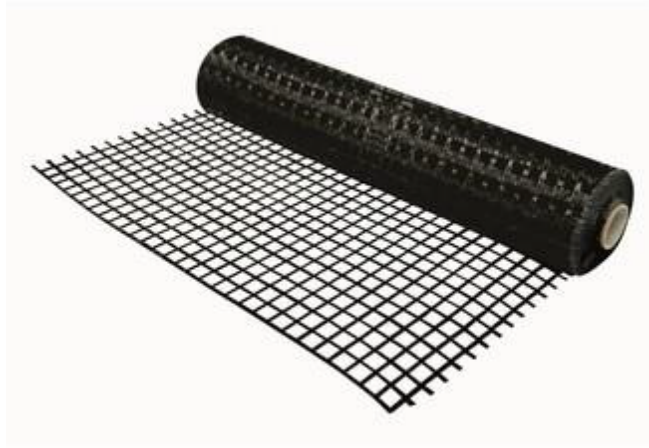


Figure II.9 : *Renforcement par grille.*

II.3 CONCLUSION

L'utilisation des méthodes classiques pour le renforcement des poutres en béton armé est limitée à cause de nombreux inconvénients. Dans ce cas le processus de l'introduction des matériaux composites à base de fibres de carbone a été accéléré par la mise au point de méthodes techniquement fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés. Le pays qui utilise aujourd'hui le plus ce procédé est le Japon, pour la protection des bâtiments et des ouvrages d'art contre le risque de destruction lors d'un tremblement de terre.

En Algérie l'utilisation des fibres de carbone sont commencées seulement de 1998 et peu d'applications ont été réalisées mais la nécessité de renforcement des ouvrages vis-à-vis des modifications du trafic (probabilité de choc, augmentation des charges et de leurs fréquences), ainsi que la mise en conformité parasismique des ouvrages entraînera probablement un développement rapide de cette technique.

Chapitre III

Effet d'adhérence entre armature et béton

III.1 INTRODUCTION

Le comportement des structures en béton armé soumises à des actions répétées et alternées (de type sismique, par exemple) résulte principalement du comportement uni axial cyclique alterné du béton et de l'acier et de leur adhérence.

La loi de comportement du béton sous chargement statique monotone est connue depuis longtemps bien que se soit manifesté récemment le manque de formulations assez générales pour s'adapter à l'accroissement des résistances vers les bétons à hautes et très hautes performances. Le comportement de l'acier sous charge monotone est bien connu depuis très longtemps. Par contre, les recherches concernant le comportement sous chargement cyclique datent d'une trentaine d'années.

III.2 ADHERENCE ENTRE BETON ET ARMATURE EN ACIER ET PRF

L'adhérence entre l'armature et le béton est un point clé dans le comportement mécanique d'une structure en béton armé. Les propriétés d'interface jouent un rôle critique dans le transfert de charge entre le béton et son renfort. Ces caractéristiques se répercutent à l'échelle de la structure, notamment sur les déformations en service (flèches), ainsi par exemple que sur la fissuration du béton d'enrobage. Le transfert de charges entre la barre en PRF et le béton est la résultante de plusieurs mécanismes:

- l'adhésion chimique entre la barre et le béton.
- le confinement de la barre induit par le retrait du béton.
- les forces de friction dues aux rugosités de l'interface et au glissement relatif entre la barre et le béton environnant.
- l'effet d'engrènement mécanique lié à la présence de reliefs entre la barre et le béton.

Il est difficile de déterminer les contributions de ces différents mécanismes sur le comportement mécanique global de l'interface. C'est donc ce dernier qui est en général étudié.

III.3 DESCRIPTION DES TEST DE LIAISONS BETON ARME

III.3.1 Dégradation sous chargement statique

La résistance à la compression du béton est déterminée, en général, sur des cylindres normalisés dont le rapport de la hauteur au diamètre est de deux. Les cylindres sont chargés longitudinalement avec une vitesse telle que la résistance maximale est atteinte au bout d'une à trois minutes. La déformation correspondant à la résistance maximale est de l'ordre de 0,2%. On obtient ainsi une courbe d'allure parabolique avec une première branche ascendante presque linéaire au début, une incurvation qui commence en même temps que des désordres intérieurs, un sommet donnant la résistance conventionnelle et une branche descendante plus ou moins raide. L'allure de la courbe contrainte - déformation en fonction de la résistance est représentée sur la figure III.1 :

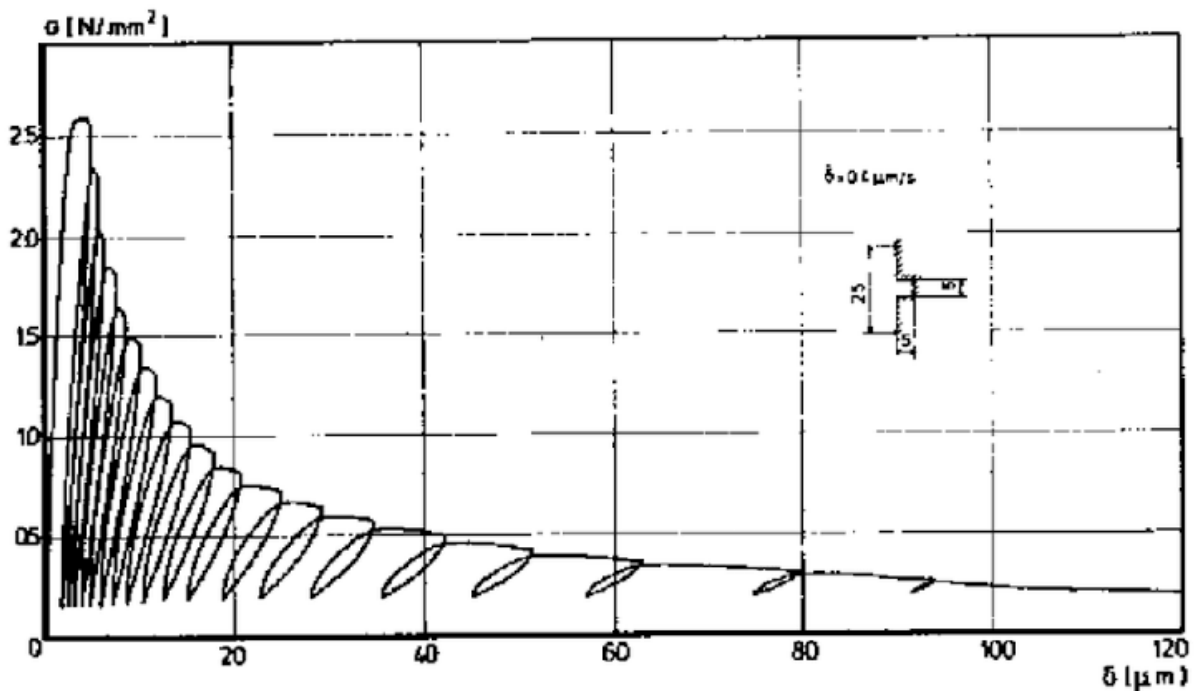


Figure III.1 : Courbes contrainte - déformation en compression uni axiale.

La résistance du béton affecte sensiblement l'allure de la courbe contrainte - déformation. Plus la résistance est grande, plus la raideur de la courbe contrainte - déformation entre l'origine et la contrainte maximale augmente. Les courbes, à branches descendantes raides, révèlent un comportement plus fragile, courant avec des bétons à hautes performances ; les courbes à branches descendantes longues correspondent à un comportement plus ductile (Figure III.1).

La résistance à la traction du béton, généralement moins de 10% de la résistance à la compression, peut être obtenue par des essais directs de traction. Cependant, pour des difficultés d'expérimentation, l'essai direct de traction n'est pas fréquemment utilisé. Quelques auteurs ont essayés, toutefois, ces dernières années à faire des expériences de traction sur des cylindres. Nous citerons, en particulier, les travaux de Terrien, Gopalaratnam . La courbe contrainte - déformation du béton en traction directe présente, généralement, une partie ascendante raide et une branche descendante raide au début et plus ou moins plate jusqu'à rupture. Le module de Young à l'origine reste le même que celui en compression. Il montre bien ces aspects. Il faut remarquer qu'après le pic de contrainte, on ne peut plus définir exactement la déformation ϵ qui n'est qu'une mesure de déplacement sur une longueur de base fixée. En effet, il y a localisation des déformations dans la fissure pour l'essai de traction, dans une zone fortement micro - fissurée dégénéralant en rupture par glissement pour l'essai de compression.

III.3.2 dégradation sous chargement cyclique

généralement on trouve deux types de chargement non-monotone : le premier consiste à appliquer une série de charges – décharges au bout de la barre, sans changer le sens du chargement (série de charges alternées) . Le deuxième, et qui est celui qui nous intéresse. Consiste à appliquer plusieurs cycles de chargement, donc chaque cycle se compose de charge – décharge- charge en sens inverse – décharge- recharge (série de charges cycliques).

III.3.2.1 Chargement cyclique de même signe

a . *Essais de Sin ha, Gerstie et Tutin:*

Cette étude comporte deux séries d'essais sur cylindres, de deux dimensions différentes, soumis à des charges cycliques répétées de compression. Elle détermine les propriétés de la courbe enveloppe et celles des courbes de chargement et de déchargement aboutissant, ainsi, à un modèle analytique , Pour des cylindres de même résistance à la compression, la courbe enveloppe des cycles est unique.

b . *Essais de Karsan et Jirsa:*

L'étude porte sur des poteaux courts rectangulaires en béton soumis à des charges axiales cycliques variables de compression. La courbe enveloppe des cycles coïncide avec la courbe monotone de compression (Figure III.2). Dans le modèle analytique développé, les auteurs définissent l'équation de la courbe enveloppe et celles des courbes de chargement et de déchargement.

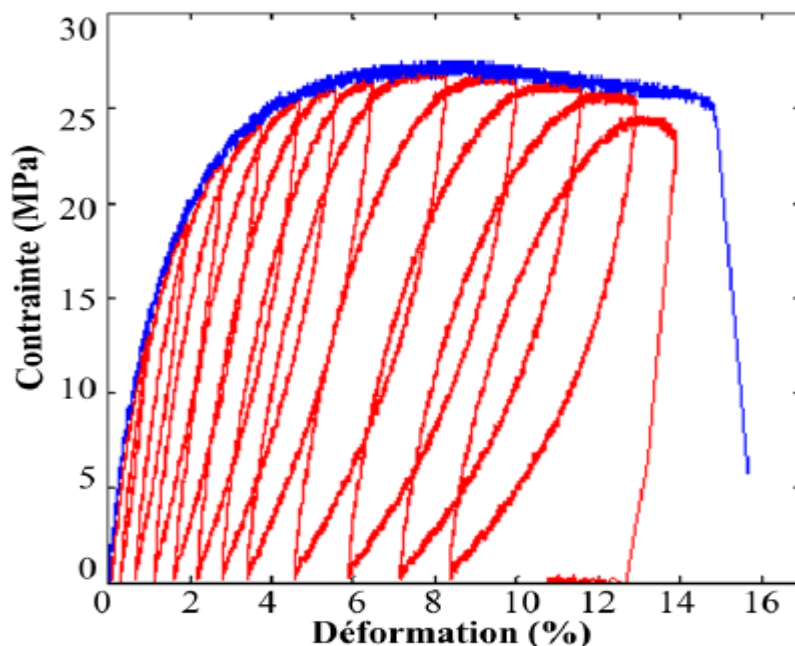


Figure III.2 : Courbe cyclique contrainte - déformation .

c. *Essais de Gopaiaratnam et Shah :*

L'étude porte sur des éprouvettes rectangulaires (76x19x305 mm). Parmi ces éprouvettes, certaines ont été soumises à des charges de traction uni axiale cyclique . Ils proposent un modèle dans lequel ils définissent les branches ascendante et descendante des courbes charge - déplacement.

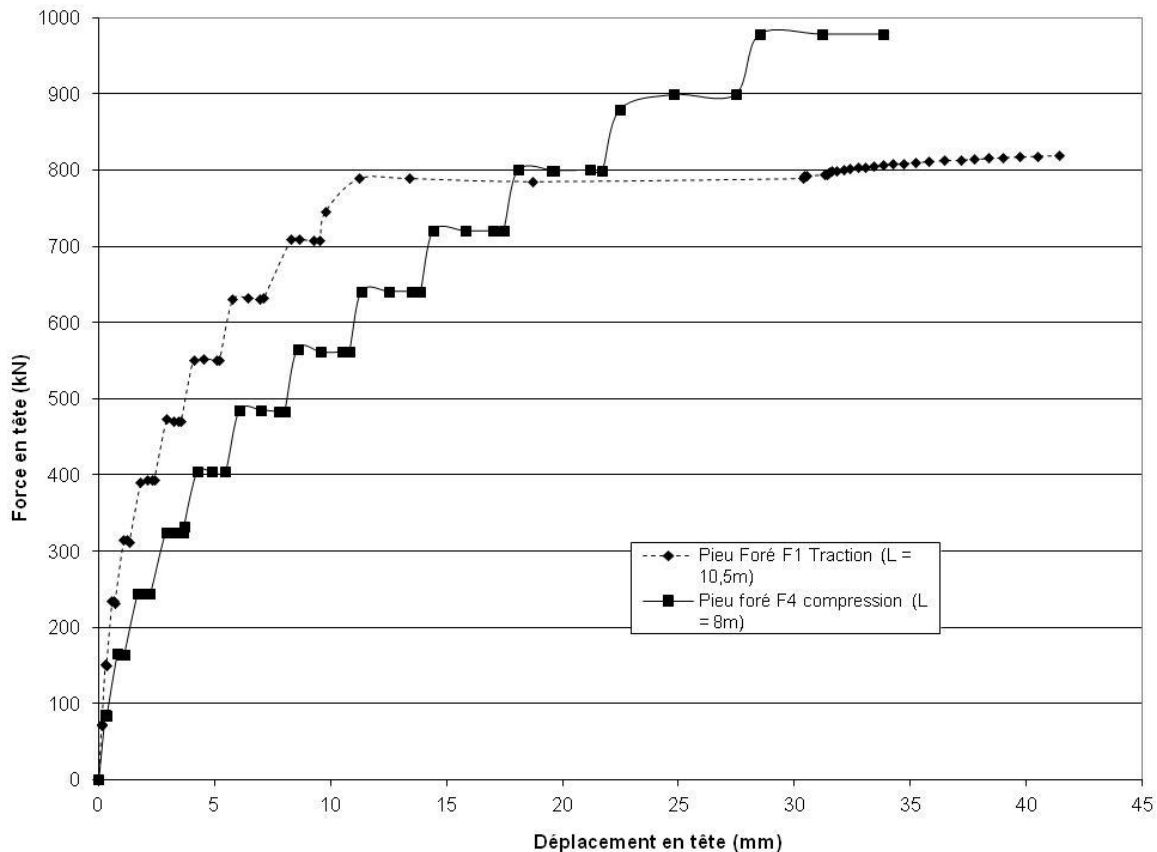


Figure III.3 : Courbe charge– déplacement.

d. *Essais de Yankelevski et Reinhardt :*

Les auteurs utilisent les résultats d'essais sur des éprouvettes de dimensions 50x60x250mm, appelées série 1, chargées cycliquement en traction sous différents historiques de chargement. Une deuxième série d'essais (série 2) est faite par les auteurs sur des éprouvettes(50x40x150 mm) qui sont soumises à un nombre différent de cycles. Les résultats obtenus ont permis d'écrire un modèle analytique dans lequel la courbe enveloppe et celles de déchargement et de rechargement sont définies .

e . *Essais de Alsulayfani et Lamirault:*

Des cylindres en béton normalisés sont soumis à des charges axiales répétées de compression et de traction . Les comparaisons effectuées entre essais statique et cyclique pour des cylindres de même composition confirment l'identité existant entre courbe statique et enveloppe des cycles. Le modèle développé dépend uniquement de la résistance à la compression du béton.

f. Essais de Ramtani :

Dans un programme d'essai sur des éprouvettes non armées ou renforcées par des barrettes d'aluminium extérieures collées, l'auteur essaie de réaliser un endommagement diffus en traction plutôt que la localisation d'une fissure unique. On note qu'il y a une importante variation du module d'élasticité sécant avec la dégradation du matériau. Ces essais permettent de s'orienter vers la définition des lois de comportement (a, s).

III.4 ESSAI D'ARRACHEMENT ENTRE BETON ET ARMATURE

III.4.1 pull-out test (essai d'arrachement)

Décrit dans les recommandations de la RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages), de l'ACI, ainsi que dans l'annexe D de la norme Française NF EN 10080, l'essai d'arrachement direct ou *Pull-out* est le plus simple à mettre en œuvre. De nombreuses études de la littérature. Le principe de l'essai ainsi qu'un exemple de montage sont illustrés sur la Figure I.20. L'armature est encastrée dans une éprouvette (cubique ou cylindrique) de béton. Un élément de séparation entre l'armature et le béton (généralement un tube) est placé du côté du chargement afin, d'une part de pouvoir régler la longueur de scellement de l'armature, mais également de limiter les effets de bords qui tendent à induire un effet de confinement supplémentaire au niveau de la zone de butée du béton. La longueur scellée correspond généralement à quelques diamètres d'armature, ce qui permet d'assurer une rupture par décohérence et glissement de la barre en PRF (un plus long scellement pourrait conduire à une rupture en traction de l'armature ou encore en fendage du béton).

Au cours de l'essai, l'évolution de la force appliquée et le glissement de l'armature sont enregistrés en continu. Cet essai permet d'établir la relation d'interface de type contrainte moyenne d'adhérence - glissement qui caractérise le fonctionnement de l'armature scellée.

Bien que cet essai ne soit pas le plus représentatif du comportement d'interface dans une section tendue d'un élément de structure, il demeure utile pour des études comparatives (différences de comportement, différences de résistances à l'arrachement).

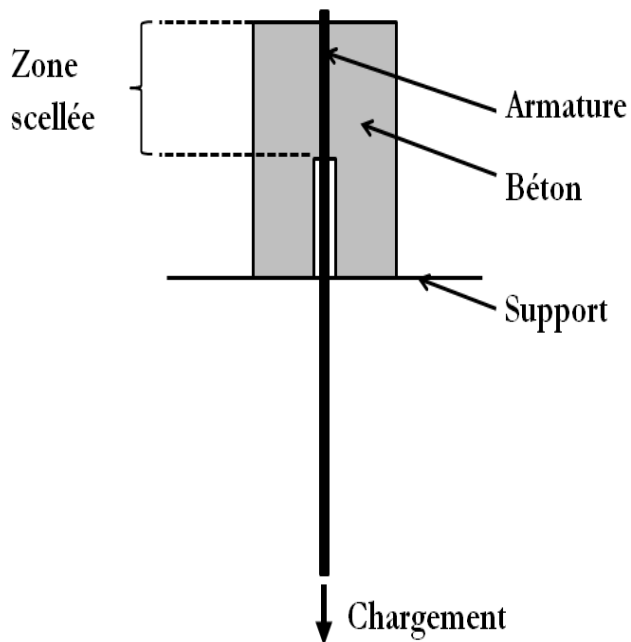


Figure III.4 : *Principe de l'essai Pull-out et exemple de montage d'essai .*

III.4.2 tirants soumis à la traction

Lorsqu'un tirant en béton armé est soumis à un chargement de traction, dès que la contrainte normale dans le béton atteint la valeur maximale de résistance, une microfissure est censée apparaître dans la section où la résistance à la rupture est la plus faible : cela va produire une décharge immédiate du béton à proximité de la fissure. A cause de cette discontinuité, les contraintes normales sont redistribuées dans le béton qui est encore en contact autour de la barre. Lorsque la résistance maximale est ensuite atteinte dans une autre section une deuxième fissure sera créée, séparée de la première d'une certaine distance, qui représente la « longueur de transfert ».

Si on continue à charger la structure, des fissures diverses pourront être créées jusqu'à ce que la force appliquée ne soit plus capable d'endommager le béton ; l'espacement des fissures est donc déterminé par les longueurs de transfert maximale et minimale observées dans le tirant.

III.4.3 les tests de poutres

Ces tests ont pour ambition d'observer d'un point de vue structurel les effets de la dégradation de la liaison en combinaison avec d'autres phénomènes mécaniques, tel que la flexion, le cisaillement ou la torsion, ainsi que l'influence d'autres phénomènes additionnels comme les efforts de « pont » sur la barre d'acier, l'écaillage du béton, l'encastrement mécanique et le chevauchement des armature.

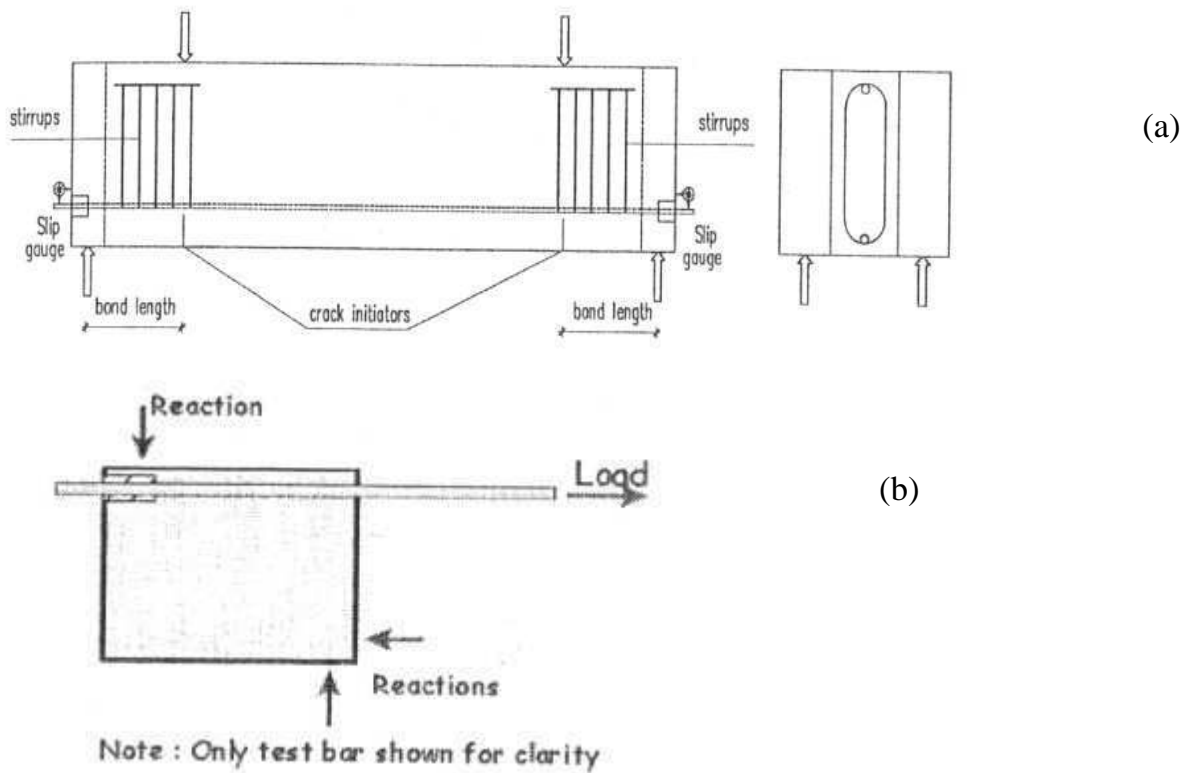


Figure III.5 : Test classique de poutre (a), et test du bord de poutre (b).

III.5 DIFFERENTS TYPES DE RUINES A L'INTERFACE

Lorsqu'on parle de la fissuration du béton armé, il faut nécessairement parler de la dégradation de la liaison acier-béton, puisque celle-ci produit des microfissures radiales qui peuvent évoluer vers différents mécanismes de rupture, et dans certains cas, elles pourront provoquer la chute de la résistance du système intégré des trois composantes : acier –liaison- béton. Suivant ces trois composantes, la ruine se présenter : soit dans le béton (fissures longitudinales et coniques). Soit dans l'acier (plastification des armatures). Soit dans liaison(fissure cylindrique). Nous présentons ici les différents types de ruine, dont l'origine est directement liée à liaison acier – béton .

Les types de ruine sont :

- a) Propagation des fissures longitudinales.
- b) Extraction du cône du béton.
- c) Plastification de l'armature.
- d) Propagation des fissures cylindriques.

III.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons fait une description actualisée du phénomène de la liaison acier-béton en fonction des observations , Ainsi a partir les processus de dégradation pour un chargement statique et pour un chargement cyclique et on a présentés les paramètres qui déterminent le comportement de la liaison.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Une grande partie du patrimoine national et des infrastructures ont atteint la fin de leur durée de vie utile. Des études ont montré l'urgence de développer des techniques de réhabilitation permettant de redonner à la structure ancienne, la capacité structurale nécessaire pour résister aux sollicitations auxquelles elle est soumise.

Parmi les techniques envisagées, l'utilisation des matériaux composites est très prometteuse. Ils présentent de nombreux avantages, puisqu'ils affichent un rapport résistance poids très élevé et ne corrodent pas, ainsi l'utilisation de ces matériaux est sûrement le meilleur choix pour des structures plus rigides.

De plus, la réparation par les composites textile-mortier permet une facilité d'imprégnation des renforts, et une réduction de leur la durée pratique de leur mise en œuvre, ces matériaux présentent en plus de ceci un bon comportement en compression et en traction. Ce travail constitue une contribution à l'étude de comportement des cylindres confinés avec une base comme alternative au renforcement par PRF. Le tissu en fibres de jute est parmi les tissus de fibres végétales les plus utilisés, pour l'application de réparation des ouvrages en béton armé, en raison de leurs caractéristiques mécaniques et physico-chimiques intéressantes, ainsi que leur prix relativement faibles par rapport à celui d'autres types de fibres.

Les travaux de ce mémoire ont été répartis en quatre chapitres. Une étude bibliographique a mis en évidence les différents types de dégradation et les techniques de réparations des ouvrages en béton armé, ainsi que les multiples utilisations des matériaux composites comme solution efficace dans le renforcement des structures endommagées.

Références

- [1]. OUZAA.KH, réhabilitation des structures, 2004.
- [2]. BOUAKKAZ.M, caractérisation du béton par les méthodes non destructives, 2012.
- [3]. S. HAOUARA, les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en BA, 2005.
- [4]. M.BROUXEL, la démarche du diagnostic, 2013.
- [5]. CLEMENT J.L, les essais de fluage sur le béton.
- [6]. A. GUETTALA, diagnostic et réparation d'un pont en BA, 2002.
- [7]. V. RINCKER, diagnostic des structures existantes, 2009.
- [8]. J.M. BERTHELOT, matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures, TEC et DOC 4eme édition, 2002.
- [9]. AMRNI. L, durabilité des éléments en BA en milieu agressif ,2012 .
- [10]. THANH. S. P, modélisation numérique de l'interface béton acier :application au comportement des structures en béton renforcées par des aciers plats crantés, 2012.
- [11]. COURARD, pathologies des bétons causes et effets, 2014.
- [12]. MOLEZ. L, maintenance et entretien des ouvrages, 2008.
- [13]. LEANA. I, durabilité des réparations des ouvrages d'art en béton, 2013.
- [14]. DESPREZ. C. A, analyse et réduction de la vulnérabilité sismique : renforcement par collage de plaque de TFC, 20120.
- [15]. ELHOUSSAIN. R, contribution à l'analyse du comportement mécanique des dalles en BA renforcées par matériaux composites, 2002.
- [16]. LONG. A. C, design and manufacturing of textile composite, 2005.
- [17]. JANG. K. K, engineered interfaces in FRP, 1998.
- [18]. R. FANGUEIRO, fibrous and composite materials for civil engineering applications, 2011.
- [19]. CLAUD. B, matériaux composites à matrice polymère.
- [20]. MARC.F, matériaux non métalliques.
- [21]. MOLIMARD. J, mécanique des matériaux composites, 2004.
- [22]. GORNET. L, généralités sur les matériaux composites, 2010.
- [23]. BRIEMEL. P, simulation numérique du renforcement des structures en BA pour des renforts en fibres, 2013.
- [24]. EGANA. M, introduction aux matériaux composites sur ABAQUS.102
- [25]. RAFIK. M, reinforcement of reinforced concrete columns with FRP and concrete jacketing,2015.
- [26]. SAMAAAN. M, model of concrete confined by fiber composites, 1998.
- [27]. FARAHMANPOUR, modélisation numérique du comportement du béton confiné par PRF,2015.
- [28]. BERRADIA. M, contribution à l'étude du confinement des colonnes en BA par matériaux composites, 2016.
- [29]. KOKSAL. H. O, stress-strain model for compressive fracture of RC columns confined withCFRP jackets.

- [30]. F. TAOUCHE, variabilité de la pression latérale de confinement : analyse des modèles.
- [31]. BOUCHER-TRUDEAU, comportement en flexion composée des poteaux circulaires en BA confinés par PRFC, 2010.
- [32]. BENZAID.R, performances des colonnes en béton confiné avec des enveloppes externes en composites PRFC.
- [33]. DESPREZ, modèle cyclique de béton confiné par TFC.
- [34]. LAERGNE. S, étude expérimentale de poteaux en BA confinés par une enveloppe en matériaux composites, 1998.
- [35]. BELHENNACHI, réhabilitation et renforcement des poteaux en BA, 2009.
- [36]. SADONE. R, comportement des poteaux en BA renforcés par matériaux composites et soumis à des sollicitations de type sismiques, 2011.
- [37]. Maher A. Adam, Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars, 2015.
- [38]. D. H. TAVARES, Behavior of reinforced concrete beams reinforced with GFRP bars, 2008.
- [39]. E. Ferrier, Comportement de structures en béton armé renforcées par matériaux composite vis-à-vis de leur mise en conformité sismique, 2007.
- [40]. Sihem Kermiche, Analyse expérimentale et analytique du comportement en flexion des poutres en béton armé pré fissurées renforcées par un matériau composite en toile de fibres de carbone (TFC), 2012.
- [41]. Todor Zhelyazov, Contribution de la mécanique de l'endommagement non local au comportement des structures en béton armé renforcées par CFRP, 2010.
- [42]. D.T Nguyen, Caractérisation et qualification du renforcement en TFC de dalles béton armé endommagées, 2001.
- [43]. AMMAR ABID, Design of Fiber Reinforced Concrete Beams and Slabs, 2011.103
- [44]. N. Attari, Efficacité du renforcement des poutres en béton armé par des matériaux composites, 2011.
- [45]. Akram Khanfour, Étude de l'influence des cycles de gel/dégel sur le comportement mécanique des poutres en béton armé de PRFB, 2014.
- [46]. T. JANKOWIAK, identification of parameters of concrete Damage plasticity constitutive model, 2005.
- [47]. La pierre.P, modélisation de poutres en béton armé renforcées avec des matériaux composites, 1999.
- [48]. IVANOVA Ivelina, Le renforcement et la réparation de console courte en béton armé par la technique de collage de matériaux composites.
- [49]. Catalin A, concrete beams reinforced with CFRP laminates, 2011.
- [50]. MARIE-JOSÉE HOUDE, modélisation de poutres en béton armé endommagées par chargements cycliques, 2007.
- [51]. PHILIPPE.D, renforcement en flexion de poutres en béton armé à l'aide de plaques en matériau composite réalisées in-situ, 1998.
- [52]. LAMOTHE.P, essais de renforcement avec matériaux composites pour des poutres de BA.

- [53]. Abdelghani. M, _Etude de poutres en béton armé renforcées par matériaux composites selon la technique NSM, 2015.
- [54]. Madi. R, analyse du comportement des poutres en béton arme renforcées par matériaux composites, 2009.
- [55]. M. BOUMAAZA, Réhabilitation des Poutres en Béton Armé Rompues au Cisaillement à l'aide des Matériaux Composites, 2015.
- [56]. Z. SEREIR, Modèle d'optimisation du volume des plaques en HFRP par MEF dans les structures renforcées en béton arme, 2013.
- [57]. Verónica.S, Renforcement d'éléments structuraux en béton armé à l'aide de matériaux composites : analyse fine de la zone d'ancrage, 2003.
- [58]. SIHEM KERMICHE, Analyse expérimentale du comportement mécanique de poutres en béton armé pré fissurées renforcées de matériaux composites de type textile polymère entoile de fibre de carbone, 2007.
- [59]. Abdelhakim. B, renforcement des poutres en béton arme à l'aide de matériaux composites, 2004.
- [60]. Merdas. A. E, Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA.104
- [61]. Ze Yi Wu, Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton armé pré fissurées et renforcées par matériaux composites sous chargement statique et de fatigue.
- [62]. ARNAUD Rolland ,Thèse de Doctorat intitulé « Comportement mécanique et durabilité de structures en béton renforcées par des armatures composites internes, 2015.
- [63]. ASTRID Billon, thèse de Doctorat intitulé « Méthode d'évaluation non-destructive de la qualité du coulage des composite de renforcement pour le génie civil » , 2016.