

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
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Mémoire
Pour l'Obtention du Diplôme
de MASTER en TRAVAUX PUBLICS
Option : Matériaux & Structures

Thème

**Influence du renforcement par matériaux
composites à base de fibres de carbone sur
les performances des éprouvettes cubiques**
Etude Expérimentale

Encadré par :

Pr KETTAB Ratiba

Dr TOUHARI Mahfoud


Présenté par :

OULDKHESSAL Mounir

Promotion 2015

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics. Garidi. Kouba.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu  de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je remercie profondément aussi et je cite nommément :

- A mon encadreur Mme KETTAB Ratiba pour avoir accepté de m'aider et de me prendre en charge.
- A mon co-encadreur Mr TOUHARI Mahfoud pour avoir m'aidé et me permettre de suivre avec lui les essais au laboratoire d'ENP.
- A Mr BALI
- A tout le personnel de l'ENSTP, et l'ENP Alger qui ont aidé et enrichi mes connaissances.
- je tiens également à remercier l'ensemble des étudiants de l'ENSTP.
- Mes remerciements s'adressent, également, aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Enfin, mes plus vifs remerciements s'adressent aussi à tous ceux qui ont aidé, encouragé et ont soutenus.

Ouldkhessal Mounir

Dédicace

Avant tout, je tiens tout d'abord de remercier  de m'avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail ; que je dédie :

À ma chère mère, À 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 Ma chère sœur SOUSSOU et mes chers frères

À toute ma famille

À toutes mes amis d'ENSTP promotion 2015

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
MOUNIR



ملخص:

تتميز تقنيات الترميم والتقوية باستعمال ألياف الكربون ببساطتها وفعاليتها ومقاومتها العالية ضد التآكسد. يعد استعمال هذه المواد لترميم المنشآت والبنىات الخرسانية جد حديث. إذ أن دراسات عديدة قد انجزت عبر العالم لمعرفة سلوك هذه العناصر المركبة.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو إجراء دراسة تجريبية لعينات مكعبة الحجم (15 X 15 X 15) سم معززة بنماذج ألياف الكربون القائم على النسيج لمقارنة النتائج مع اختبار لعينات مكعبة غير مقواه مع تغيير نوعية الخرسانة في كل مرة. التجارب أجريت في مختبر المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات بالجزائر.

أظهرت هذه الدراسة تأثير مفيد من المواد المركبة على تحسين قدرة عينة مكعبة ضد الضغط.

الكلمات المفتاحية: التعزيز، المواد المركبة، ألياف الكربون، عينة مكعبة، خرسانة

Résumé :

Les techniques de réparation et renforcement par collage de composites de fibres de carbone se caractérisent par leur simplicité de mise en œuvre et leur efficacité. Plusieurs études ont été réalisées sur le comportement d'éléments renforcés par ces composites à travers le monde.

L'objectif principal de cette étude est de faire une étude expérimentale sur des modèles réduits "éprouvettes cubiques de dimensions (15X15 X15) cm" renforcé par un tissu à base de fibres de carbone CFPR. Afin de comparer les résultats avec des éprouvettes non renforcées tout en changeant la qualité de béton. Les essais ont été réalisés au laboratoire de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.

Cette étude a montré l'effet bénéfique de matériaux composites sur l'amélioration de la capacité de l'éprouvette cubique vis-à-vis la compression

Mots clé : renforcement, matériaux composite, fibre de carbone, modèle Cubique, béton ;

Abstract:

Repair techniques and reinforcement by bonding carbon fiber composites are characterized by simplicity of implementation and efficiency, and several studies have been conducted on the behavior of these reinforced composites elements worldwide. The main objective of this study is to make an experimental study of reduced " cubical specimens dimension (15X15 X15) cm 'reinforced by a fabric-based carbon fiber PRTC models to compare the results with any test not strengthen in changing the quality of concrete, tests were performed in the laboratory of the National Polytechnic School.

This study demonstrated the beneficial effect of the composite materials on improving the ability of the cubical specimen vis-à-vis the compression.

Keywords : reinforcement, composite materials, carbon fiber, cubical model, concrete ;

SOMMAIRE

	Page
INTRODUCTION GENERAL	1
OBJECTIF DE L'ETUDE	1
Chapitre I : Désordres Et Réparation Des Structures En Béton Armé	
I.1. Généralités	2
I.2. Introduction	2
I.3. Les phases de dégradation	2
I.4. Dégradation des ouvrages en béton armé	2
I.4.1 Dégradation des Matériaux	2
I.4.2 Dégradation dû aux erreurs de conception ou d'exécution	3
I.4.3 dégradation du à la corrosion des armatures	5
I.5 Moyens et procédures de diagnostic des désordres des ouvrages en béton.	6
I.5.1 Les moyens de diagnostic	6
I.5.2 Procédure de diagnostic	7
I.5.2.1 Qualité des matériaux	7
I.5.2.2 Mesures des déformations.	7
I.5 Conclusion	7
CHAPITRE II METHODE DE REPARATION ET DE RENFORCEMENTS.	
II.1 Introduction	8
II.2 Traitement de Surface	8
II.2.1 Ragréages	8
II.2.2 Injection des fissures	8
II.3 Protection du Béton et des Armatures	9
II.3.1 Techniques de protections du béton	9
II.3.2 Protection des armatures	10
II.4 Régénérations des Matériaux	10
II.5 Techniques de renforcement	11
II.5.1 Définition	11
II.5.2 Techniques de Renforcement Classiques des Eléments Structuraux	11
II.5.2.1 Gainage (Chemisage)	11
II.5.2.2 Injection des fissures :	11
II.5.2.3 Béton projeté	11
II.5.2.4 Renforcement par précontrainte extérieure	12
II.5.3 Renforcement par placage des tôles d'acier	12
II.5.4 Renforcement par l'adjonction de matériaux composites	12
II.6 Conclusion	13

Chapitre III	RENFORCEMENT PAR LES MATERIAUX COMPOSITES.	
	III.1 Introduction	14
	III.2 Définition d'un Matériaux composites	14
	III.3 Types des Composites	15
	III.4 Polymères renforcés de fibres « PRF »	15
	III.4.1 Avantage et inconvénients des PRF	15
	III.4.2 Les fibres :	16
	III.4.3 Les matrice :	17
	III.4.4 comportement de la fibre de carbone, fibre de verre et acier doux	18
	III.5 Procédés de mise en œuvre des renforts composites	18
	III.5.1 Généralités sur les renforts composites	18
	III.5.2 Notion de multicouches composites pour la réparation des ouvrages	20
	III.6 Conclusion	21
CHAPITRE IV	ETUDE EXPERIMENTALE	
	IV.1 Introduction	22
	IV.2 Objectifs de l'étude expérimentale	22
	IV.3 Matériaux utilisé	22
	IV.3.1 Le Ciment	22
	IV.3.2 Les Granulats	22
	IV.3.3 L'eau	23
	IV.3.4 la fibre de carbone utilisée	24
	IV.3.5 système de résine	24
	IV.4 Préparation des échantillons	24
	IV.5 Procédures d'essai	26
CHAPITRE V	RESULTATS ET INTERPRETATIONS	
	V.1 Introduction	27
	V.2 Observation (mode de défaillance)	27
	V.3 les Résultats	28
	V.4 Interprétations des résultats	29
	CONCLUSION GENERALE	30
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	31

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Ségrégation due au mauvais malaxage et coulage	04
Figure II.1	Technique de Béton projeté	12
Figure III.1	Composantes de base	15
Figure III.2	Courbes contrainte-déformation des PRFV, PRFC et des aciers doux	18
Figure III.3	Conception du système multicouche	21
Figure IV.1	La Courbe Granulométrique des Granulats Utilisés	23
Figure IV.2	Eprouvette témoin	25
Figure IV.3	Eprouvette après Renforcement	25
Figure IV.4	mise en place des Epreuves	26
Figure V.1	Mode de rupture des éprouvettes cubiques confines par la fibre de carbone	27
Figure V.2	courbe de l'évolution de la résistance à la compression des éprouvettes renforcées	28
Figure VI.3	graphe montrant le rapport f_{cc}/f_{c0} Pour les deux bétons	28

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1 Caractéristiques essentielles des fibres de verre	16
Tableau III.2 Caractéristiques essentielles des fibres de carbone	16
Tableau III.3 Propriétés des fibres.	17
Tableau IV.1 Les différentes compositions du béton	23
Tableau IV.2 Propriétés du tissu de fibre de carbone	24
Tableau IV.3 Propriétés de la résine époxy fourni par le fabricant	24
Tableau IV.4 La résistance a la compression a 28j des éprouvettes témoins	27
Tableau V .1 valeur moyenne des résultats expérimentaux	28

INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les matériaux composites ont été utilisés par l'homme depuis des millénaires dans le domaine de la construction. Le pisé de paille et d'argile est l'un des plus anciens matériaux composites dont l'idée était d'exploiter la résistance à la rupture des fibres, en laissant à une matrice de qualité mécanique inférieure, le soin de maintenir ces fibres dans la forme voulue.

L'examen pathologique des différentes structures en béton armé, montre que le dégât de matière est principalement dû au mauvais dimensionnement, aux manques d'études fiables notamment sur la durabilité et à la non prise en compte du chargement externe extrême. Les bâtiments et les ponts endommagés ont besoin de réparations avec des méthodes fiables et de nouveaux types de matières. La réparation par les techniques des composites à base de fibres du carbone est caractérisée par des performances en rapport avec leur poids léger, leur rigidité, la facilité de mise en œuvre, leur efficacité, leur haute résistance à la traction, le coût raisonnable et la durabilité totale très appréciable.

Les ouvrages en béton armé peuvent être endommagés durant leur durée de vie par vieillissement des matériaux ou par modification des conditions d'exploitation.

Une enquête menée par le CTTTP en 2003 a montré que 44% des ouvrages d'art présentent des désordres qui nécessitent des travaux de confortement. Après le séisme du 21 Mai 2003, 86106 bâtiments ont été endommagés dans la Wilaya d'Alger uniquement. Ceci montre le nombre élevé d'ouvrages devant être réhabilités.

Les matériaux composites en fibres de carbone, grâce à leurs caractéristiques mécaniques élevées, leur faible poids propre, et leur facilité de mise en œuvre sont des matériaux particulièrement intéressants pour le confortement et le renforcement d'ouvrages. L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'effet du renforcement de poteaux carrés en béton armé par collage de composites à base de fibres de carbone, et de contribuer à la bonne maîtrise de cette technique qui reste toujours peu connue en Algérie.

OBJECTIF DE L'ETUDE

Le but principal de cette étude est de voir expérimentalement l'effet de renforcement des éprouvettes cubiques de dimensions (15x15x15) cm par le tissu de fibre de carbone en utilisant deux (2) qualités de béton.

CHAPITRE I :

***DESORDRES ET
REPARATION DES
STRUCTURES EN BETON
ARME***

I.1 GENERALITES

Dans ce chapitre, on présente les principaux désordres affectant les structures en béton armé, puis on citera les différentes techniques et procédés de réparation et de renforcement connus dans ce domaine.

I.2. Introduction

Un ouvrage de génie civil est dimensionné pour une durée de vie de cent (100) ans en moyenne ; Toutefois, plusieurs types de désordres et de dégradations apparaissent au cours de sa mise en service.

I.3. Les phases de dégradation

La dégradation du béton armé comporte deux phases :

a) Une phase d'incubation ou de latence (dite parfois d'amorçage) qui correspond à l'altération lente du béton, sans que ne se produisent encore des effets visibles. Cette phase s'arrête, soit lorsque

- Les produits formés par les réactions internes du ciment atteignent un "volume critique " provoquant un gonflement néfaste du béton (par exemple, par réaction sulfurique),
- L'enrobage de béton ne protège plus les aciers contre la corrosion (par exemple si l'enrobage est carbonaté).

b) Une phase de développement (dite parfois de croissance) des dégradations des matériaux.

I.4. Dégradation des ouvrages en béton armé

Pour évaluer la durabilité d'un béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation, et d'étudier la résistance du matériau vis-à-vis de ses endommagements.

Si l'on exclut, d'une part les événements accidentels, et d'autre part les effets à long terme des sollicitations mécaniques, tels que la fatigue due à des sollicitations répétées ou le fluage pouvant engendrer des pertes de précontrainte ou encore l'abrasion, la durée de vie des ouvrages en béton armé peut être limitée par la dégradation des matériaux; celle due aux erreurs de conception et d'exécution ou à la corrosion des armatures.

I.4.1 Dégradation des Matériaux

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

- Chocs, érosion, abrasion : principalement sur les ouvrages se situant en milieu maritime ;
- Action des cycles de gel-dégel : dans les régions à climat froid ;
- Altération physico-chimique du béton : dans les milieux agressifs ;
- Retrait du béton : principalement dans les environnements chauds et secs ;
- Corrosion des armatures métalliques par manque d'enrobage, par carbonatation ou par attaque aux chlorures.

I.4.2 Dégradation due aux erreurs de conception ou d'exécution

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

Dans le premier cas, les causes de fissuration et de dégradation sont dues à des hypothèses erronées au niveau des conditions de chargement, d'environnement, ou de fonctionnement de l'ouvrage. Ces erreurs sont à l'origine, généralement, d'un mauvais dimensionnement des sections et d'une disposition non satisfaisante des armatures qui se traduisent par des localisations de fissures ou des ruptures non acceptables. Parmi les conditions particulièrement mal évaluées, il est possible de faire état de l'action des gradients de température sur un ouvrage, de la mauvaise estimation des efforts de précontrainte due à des erreurs de tracé mais aussi à des données erronées sur la relaxation des câbles et sur leur interaction avec la structure (frottement). Un mauvais dimensionnement des cadres et de leur espacement pour reprendre les efforts tranchants en béton armé est à l'origine de fissurations des ouvrages qui nécessitent une réhabilitation immédiate.

Des enquêtes statistiques, menées par le bureau Sécuritas de la SOCOTEC en France sur 2979 dossiers de structures en béton, ont montré que le nombre total de sinistres dus à des erreurs de conception, d'étude ou d'exécution est comme suit :

a) Erreurs d'exécution et de réalisation (82.9% des cas)

Ces erreurs sont des :

- Dispositions défectueuses (notamment dispositions d'armatures) dans certains éléments ou dans la transmission des efforts (environ 2.5%).
- Désordres résultants de déformations excessives (soit 19.7%)/
- Fautes d'exécution, surtout la confection des éléments en béton armé (15.5%) :
Coffrage 2% ; Bétonnage 4% ; Ferrailage 7% ; Décoffrage 0.5% ; Causes multiples (généralement bétonnage et ferrailage défectueux) 1.5%.
- Fausses manœuvres 1.5%.
- Désordres résultant des effets des variations dimensionnelles 43.7%.

➤ Erreurs lors de la mise en place de ferrailage

- Non-respect des plans de ferrailage ;
- Mauvaise disposition des armatures.

➤ Erreurs lors du malaxage et du coulage

- Un malaxage trop court
- Un déchargement très lent des malaxeurs à tambour non inclinable qui cause la ségrégation (Fig I.1).
- Généralement l'équipe sur chantier essaye de couler le béton rapidement, laissant tomber librement le béton surtout lorsqu'on bétonne un élément d'une hauteur importante avec une forte densité de ferrailage, ce qui peut nuire à son homogénéité.

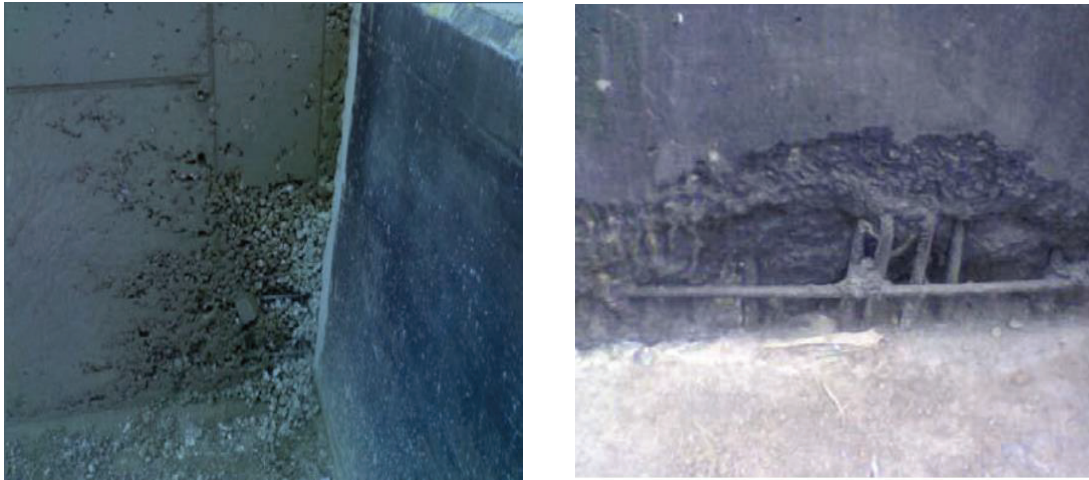


Fig I.1 Ségrégation due au mauvais malaxage et coulage

➤ Erreurs lors du coffrage et du décoffrage

Ces erreurs sont :

- L'absence d'écarteurs de coffrage peut engendrer une insuffisance d'enrobage ;
- Un coffrage peu étanche permet à une partie de ciment de s'échapper ;

Théoriquement, il faut laisser le coffrage le plus longtemps possible, car il conserve l'humidité nécessaire au mûrissement du béton. Mais en pratique, l'entrepreneur enlève le coffrage le plus rapidement possible pour l'employer dans un autre ouvrage. Certains éléments dépendent uniquement des coffrages pour supporter les charges appliquées et leur propre poids pendant les premiers jours, surtout le cas des éléments soumis à la flexion (les dalles et poutres). Avec un ciment portland normal, une période de mûrissement est de l'ordre de 7 jours ; une période plus courte se traduit par une résistance et une durabilité amoindries.

➤ Mauvaise vibration du béton

- Une vibration trop brève ou pas assez puissante peut provoquer des défauts d'homogénéité
- Une vibration trop forte, au-dessus des barres de diamètres importants placées trop près de la surface induit la fissuration précoce ;
- Une vibration excessive produira une certaine ségrégation dans le mélange particulièrement dans les bétons assez fluides ;

➤ Cure du béton

- La vitesse d'hydratation étant plus grande durant les premiers jours, c'est à ce moment qu'on a le plus besoin d'un mûrissement (cure) convenable, car l'évaporation de l'eau est très importante si la cure est inadéquate, surtout les éléments minces où la dimension de la surface exposée favorise l'évaporation.
- Fissures dues au : retrait plastique, retrait du au séchage, différences de température et à la combinaison de ces facteurs.

b) Erreurs de conception (3.5%)

- Erreurs dans le bon choix du matériau constituant l'ouvrage.
- Erreurs dans le pré - dimensionnement des éléments.
- Négligence totale de la sismicité de la zone.
- Mauvais choix de la meilleure variante.
- Absence de l'étude comparative technico-économique.
- Structure instable.

c) Erreurs de calcul (études) (13.6%)

- Erreurs dans l'hypothèse de calcul ;
- Erreurs dans l'introduction des données dans un calcul automatique ;
- Absence d'étude ;
- Mauvaise utilisation des règlements ;
- Non vérification des états de service (déformations) ;
- Dessins incomplets ou insuffisants ;

I.4.3 dégradation due à la corrosion des armatures

Les sulfates contenus par exemple dans l'eau de mer et les eaux séléniteuses peuvent provoquer le gonflement du béton, s'ils sont en quantité suffisante. Mais les agents qui sont à l'origine de la corrosion des armatures sont surtout le dioxyde de carbone et les chlorures. Le dioxyde de carbone CO_2 pénètre sous forme gazeuse dans le béton. Il provoque une réaction, dite de carbonatation, avec l'eau interstitielle. Le front de carbonatation avance progressivement à partir du parement. Il transforme les hydroxydes [surtout, la chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$] en carbonate (CaCO_3) et abaisse le PH de la solution interstitielle; les structures en béton armé sont en contact avec le milieu naturel (atmosphère, eaux ou sols). Ces milieux contiennent souvent des produits qui sont agressifs vis-à-vis du béton ou des armatures. Ceci dégrade la passivation des armatures.

Les chlorures dissous dans l'eau (eau de mer, sels de déverglaçage, etc.) pénètrent à partir de la surface du béton. Ainsi, la teneur en chlorure 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, de façon permanente, saturé d'eau (l'eau interstitielle ne s'évaporant pas).

I.4.4 Cas des ponts

Les facteurs influençant sur la dégradation des ponts sont liés aux défauts de conception et aux méthodes d'entretien, avec.

1. Dans 40% des cas, les facteurs d'influence sont liés aux défauts de conception :
2. Dans 30% des cas, les facteurs d'influence sont liés à l'absence d'entretien :
3. Dans 10% des cas, les facteurs d'influence sont liés à la mise en œuvre :
4. Pour les facteurs liés à l'exploitation (8%) : en fonction de l'évolution de trafic, Ou de la modification des charges réglementaires sur essieux .ou de la voirie ; Il est possible de justifier la nécessité de renforcer ou d'améliorer la portance d'un ouvrage .En plus, les ponts sont appelés à être mis en conformité vis-à-vis des sollicitations sismiques ou vis-à-vis des sollicitations accidentelles telles que l'impact des véhicules
5. Les facteurs liés à l'environnement (agressivité du sol et conditions climatique. (7%)
6. Les facteurs liés à la nature des matériaux (5%).

I.5 Moyens et procédures de diagnostic des désordres des ouvrages en béton armé

Le choix et l'application des produits de réparation et de protection des ponts en béton définissent six étapes dans le processus conduisant à une action de réparation. Le diagnostic intervient dans les deux premières étapes de ce processus.

- La première étape, appelée « étape de mise en évidence de la dégradation », peut être déclenchée par une opération de surveillance, une opération d'entretien, ou à la suite d'un évènement accidentel (chute de morceaux de béton par exemple). Elle débouche sur le transfert de l'information vers les responsables qui sont ainsi sensibilisés au problème observé.
- La deuxième étape est le « diagnostic » proprement dit, ou recherche d'une pathologie à partir des symptômes. Il est demandé dans le cadre :
 - ✓ d'une étude spécifique,
 - ✓ de travaux de réfection, de rénovation ou de renforcement,
 - ✓ d'une inspection régulière mettant en évidence des désordres,
 - ✓ d'une expertise,
 - ✓ d'une démarche préventive,

Le diagnostic doit permettre d'obtenir un relevé de tous les désordres, même mineurs, qui affectent le tablier, les appuis y compris les fondations et même les superstructures et les accessoires d'équipement de l'ouvrage. Ceci de façon à pouvoir traiter la réparation, ou le renforcement, globalement et à éliminer, si possible le risque de voir surgir en cours de travaux un vice caché.

I.5.1 Les moyens de diagnostic

Les moyens d'investigation des désordres sont donnés comme suit :

- Examen visuel (avoir une lampe de poche, paire de jumelle, appareil photo, un endoscope qui permet d'examiner des gaines de canalisation sans procéder à des travaux de démolition).
- Mesures qui peuvent être faites par : un mètre précis, un niveau d'eau, un fil à plomb, un pied à coulisse, des jauges d'épaisseur ou une boussole.
- Contrôle de planéité, de niveau, d'alignement (par un cordeau de maçon, un jeu de règles métallique allant de 0.2 à 2m, un niveau de géomètre pour vérifier les niveaux de pentes et de flèche, ainsi qu'un inclinomètre).
- Examen des fissures, par une loupe graduée pour évaluer les ouvertures de fissure, des fissuromètres pour suivre l'évolution des ouvertures.
- Connaissance du taux d'humidité des matériaux, avec des hydromètres électriques fournis avec des échelles de conversion en tenant compte la nature des matériaux et la température de l'environnement.
- Déterminer la vitesse d'absorption d'eau ;
- Prélèvements d'échantillons en disposant de : burins, marteau, tournevis, jeu de clefs, une pince, scies à bois et métal, quelques seringues, une foreuse, de tampons de coton pour le prélèvement de dépôts.
- Pachomètre permettant d'évaluer l'enrobage du béton.

I.5.2 Procédure de diagnostic**I.5.2.1 Qualité des matériaux**

La recherche de la qualité des matériaux est faite par des études sur des prélèvements :

- **Essais mécaniques** : Les essais effectués sur les prélèvements, sont la compression, la traction...etc. L'interprétation des résultats est sensible à toutes les constatations qui pourront être faites lors de l'extraction des éprouvettes jusqu'à la fin des essais.
- **Essais physiques** : Il s'agit principalement de mesures de densité, mais aussi de porosité, de teneur en eau, etc. On peut aussi appliquer la technique d'auscultation sonore (mesure de la vitesse de propagation d'ondes sonores).
- **Essais chimiques** : Les phénomènes de détérioration chimique sont à bien des égards similaires aux mécanismes de dégradation des bétons par le gel (qui résultent de la formation de la glace dans les pores du matériau).

Dans certains cas, il arrive également que les matériaux cimentaires comme le béton se dégradent simplement par dissolution graduelle de la pâte de ciment hydraté sans que ce phénomène ne s'accompagne nécessairement d'une précipitation de nouvelles phases.

C'est notamment le cas pour les structures exposées à des mouvements importants d'eau. Ceux-ci favorisent le lessivage de certaines phases solides comme la portlandite et les silicates de calcium hydratés (C-S-H), ce qui contribue à augmenter la porosité du matériau et à en réduire les propriétés mécaniques.

Les études chimiques et physicochimiques peuvent faire appel à des moyens coûteux (diffraction aux rayons X (DRX), microscopie électronique à balayage (MEB)...).

I.5.2.2 Mesures des déformations**a) Déformation de l'ouvrage à vide**

Des mesures topographiques ou de nivellement permettent, soit d'appréhender les mouvements des appuis ou fondations (tassements différentiels, déplacements), soit d'estimer les déformations permanentes d'un tablier. Il est noté que l'évolution des flèches, ne peut être obtenue qu'à partir de très nombreuses mesures étalées sur une longue période, de façon à éliminer les déformations thermiques qui perturbent les résultats.

b) Déformation de l'ouvrage en charge

La comparaison des déformations calculées à celles mesurées, permet d'en déduire le fonctionnement mécanique de l'ouvrage. Il est souhaitable, lorsqu'on fait de telles mesures sur un ouvrage, de reconstituer les essais de réception afin d'obtenir des recoupements.

I.6 Conclusion

La gestion du patrimoine est une problématique de plus en plus présente dans le domaine du génie civil. Economiquement, la réhabilitation des ouvrages s'avère généralement plus avantageuse que la reconstruction, d'où l'intérêt croissant que portent les maîtres d'ouvrages aux techniques d'auscultation et aux méthodes de renforcement ou/et de réparation.

CHAPITRE II :

METHODES DE REPARATION ET DE RENFORCEMENT

II.1 Introduction

La réparation d'une construction est une opération qui consiste à lui restituer, par des travaux appropriés, un niveau de service perdu. La baisse du niveau de service peut résulter de toutes sortes de causes ; les plus fréquentes sont la dégradation progressive des propriétés des matériaux (agressions atmosphériques, modification des propriétés des matériaux,...), l'utilisation intensive (effet de la répétition des charges) voire abusive (utilisation au-delà des charges prévues), les accidents et sinistres (chocs, incendies, séisme etc...)

Suivant l'importance et les causes des désordres affectant une structure en béton armé, le projet de réparation repose, en général, sur la mise en œuvre d'une combinaison de plusieurs techniques que l'on peut ranger dans l'une des trois catégories suivantes :

- Traitement de surface : ragréages et injection des fissures ;
- Protection du béton et des armatures ;
- Régénération des matériaux ;

II.2 Traitement de Surface

Les principaux traitements de surface sont les ragréages et l'injection des fissures.

II.2.1 Ragréage

Le ragréage consiste en premier lieu à préparer avec soin les surfaces à traiter afin de créer un support sain, propre, rugueux, de nature à favoriser une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise. Les techniques les plus courantes sont l'hydrodémolition, le décapage par marteau pneumatique, le bouchardage, le burinage et le piquage par petit marteau pneumatique.

Il existe sur le marché une grande quantité de produits de ragréage qui peuvent être classés en trois catégories principales :

- les produits à base de liants hydrauliques, constitués par un mélange de sable, de ciment, de résines miscibles dans l'eau et éventuellement de fibres ; ce sont les produits les plus utilisés.
- les produits à base de résines de synthèse, constitués de sable (dans le cas de mortier), de polymères organiques réactifs additionnés d'adjuvants spécifiques et, éventuellement, de charges minérales. Les produits les plus utilisés sont ceux à base de résines époxydiques ou polyuréthanes.
- les produits mixtes, qui sont des produits à base de ciment et de polymères organiques réactifs.

II.2.2 Injection des fissures

L'activité et l'évolution des fissures, permet de distinguer les fissures inertes des fissures actives dont l'ouverture varie en fonction des facteurs extérieurs tels que : température, charges, vibrations et hygrométrie.

On distingue deux grandes catégories de traitement : les traitements de surface et le traitement dans la masse.

a) Traitements de surface

Il permet essentiellement d'assurer ou de rétablir l'étanchéité de la surface d'une structure et d'éviter ou de stopper la corrosion des armatures. Parmi ces traitements, on peut citer :

- **le 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.
- **l'imprégnation** : qui permet d'étancher une surface présentant un réseau important et diffus de microfissures. Le produit est passé sur la surface concernée, à la brosse ou au rouleau.
- **le pontage** : qui rend hermétique l'ouverture de la fissure par application superficielle d'un film généralement armé et adhérent, de 3 mm d'épaisseur, de part et d'autre des lèvres de la fracture.

b) Traitement dans la masse

Il consiste à injecter en profondeur un produit liquide qui, après durcissement, a des caractéristiques mécaniques voisines de celles du matériau environnant. L'injection se fait par cheminement du produit liquide dans la fissure, de l'extérieur vers l'intérieur, après obturation de la partie visible de la fissure.

II.3 Protection du Béton et des Armatures

II.3.1 Techniques de protection du béton

Lorsque l'enrobage des aciers est trop poreux ou d'épaisseur insuffisante, ou lorsque l'environnement est particulièrement agressif, il est souvent nécessaire d'appliquer un traitement de protection du béton. Une telle protection peut aussi être appliquée à un mortier fraîchement déposé, vis à vis des agressions atmosphériques, des fondants de l'eau de mer, des attaques chimiques ou bactériologiques ou, tout simplement, vis à vis de la pénétration de l'eau, afin d'assurer une grande durabilité de la réparation. On distingue cinq grandes familles de produits qui ont des caractéristiques différentes :

a)Hydrofuges de surface : Destinés à rendre la surface du béton imperméable à l'eau. Il s'agit principalement de silicone en solution aqueuse que l'on peut appliquer à une surface légèrement humide.

b) Minéralisateurs : Ce sont des produits qui contiennent des atomes de silicium capables de réagir avec le calcium contenu dans la chaux du ciment pour donner des microcristaux de C-S-H qui pénètrent dans les pores et créent une sorte de "minéralisation" du support.

c) Peintures : On peut protéger le béton par de la peinture, qui joue aussi un rôle esthétique. Ces peintures sont à base des copolymères acryliques ou vinyliques en émulsion aqueuse, ou autres résines époxydiques.

d) Revêtements minces à base de liant hydraulique modifié ou à base de polymère

Qui sont appliqués en une ou deux couches sur des épaisseurs totales de 1 à 2 mm. Ces revêtements minces constituent la meilleure protection contre les agressions extérieures, mais pour les surfaces horizontales, la protection est difficile en raison des stagnations des eaux.

e) **Revêtements plastiques épais** : Ils ont la même composition que les peintures classiques, mais comportent en plus des charges dont la granulométrie atteint le millimètre.

Ils sont appliqués avec un dosage de 1.5 à 4 kg/m², et donnent une épaisseur finale de 1 à 3 mm, Le liant est souvent une résine acrylique en émulsion.

II.3.2 Protection des armatures

a) Prévention de la corrosion des armatures

La corrosion est la principale cause de dégradation des ouvrages en béton armé. Le risque de corrosion peut être réduit considérablement si les précautions suivantes sont respectées :

- L'enrobage suffisant des armatures selon l'environnement
- Qualité des bétons
- Dosage minimal en ciment : L'épaisseur carbonatée est d'autant plus faible que le dosage du béton en ciment est plus élevé.
- Compacité suffisante du béton par une vibration adéquate.

b) Protection des armatures

Les principales causes de la corrosion des armatures du béton armé, sont la carbonatation et la présence d'ions agressifs tels que les chlorures dans un milieu sec et humide. Les armatures peuvent être protégées par :

- **Protection cathodique** qui est une technique permettant de stopper un processus de corrosion. Elle doit être appliquée avant que les risques d'ordre mécanique soient importants. Cette méthode consiste à abaisser en un point de l'armature le potentiel de ce métal jusqu'à une valeur qui est telle que la vitesse de corrosion de l'acier devient négligeable. L'abaissement de potentiel est obtenu en imposant le passage d'un courant électrique qui va de l'enrobage vers l'armature.
- **Les inhibiteurs de corrosion** qui sont des composés chimiques à base de nitrite ou benzoate de sodium, qui prolongent la passivité de l'acier dans le béton en présence d'agents agressifs, s'ils sont appliqués sur les barres d'acier.
- **Revêtement des armatures** par revêtement organiques de polymères comme les résines époxy, ou par revêtement métallique comme le zinc.

II.4 Régénérations des Matériaux :

Plusieurs techniques peuvent être appliquées :

a) Technique de réinjection des câbles de précontrainte

Cette technique, applicable pour les structures en béton précontraint, consiste à remplacer l'air présent dans la cavité (vides laissés par une injection incomplète de câbles de précontrainte), par un produit du type coulis de ciment très fluide et stable. Le remplissage ne

peut être complet que si l'on parvient à évacuer l'air emprisonné. Pour ce faire, on utilise la technique du vide qui exige l'emploi de tuyauterie et de produits spéciaux.

b) Extraction des chlorures

Ce traitement, permet d'extraire les chlorures présents dans le béton de la structure ; ce traitement peut durer de 6 à 12 semaines et permet d'extraire 40 à 50 % des chlorures situés dans le béton, surtout au voisinage de la surface

c) Autres procédés

Il existe d'autres procédés de régénération des matériaux, tels que la ré-alcanisation du béton et le procédé récent électrochimique appelé extraction des chlorures et ré-alcanisation par auto-génération de courant.

II.5 TECHNIQUES DE RENFORCEMENT

II.5.1 Définition

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service en particulier (augmentation de ductilité, de la résistance etc...) 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

II.5.2 Techniques de Renforcement Classiques des Eléments Structuraux

II.5.2.1 Gainage (Chemisage)

L'utilisation des gaines convient particulièrement à la réparation des poteaux, des piles et des pieux détériorés. Cette technique consiste à reconstituer la section d'un élément en service (surtout celle d'un élément travaillant en compression) en le gainant de béton. Il n'est pas nécessaire que l'élément d'origine soit lui-même en béton ; il est possible de gainer des sections en acier ou en maçonnerie.

Les travaux de préparation des surfaces avant l'opération de gainage revêtent une importance primordiale. Le coffrage de la gaine doit être muni de cales d'espacement destinée à prévoir un vide entre le coffrage même et la surface du béton ou matériau initial. Ce coffrage peut être temporaire ou permanent. Il peut être en bois, en acier ou en béton préfabriqué, selon sa destination et les conditions d'exploitation.

II.5.2.2 Injection des fissures

Les éléments en béton, endommagés dont les fissures sont stables et qui ont une largeur comprise entre 0.2 mm et 2 mm peuvent être réparés par la technique d'injection de résine. Il est bien entendu que le béton des zones fissurées n'est ni disloqué ni écrasé. Les éléments dont les fissures dépassent 2 mm de large peuvent être réparés par injection de mortier époxydique.

Les travaux d'injection se font en deux étapes : la préparation des fissures, et l'injection proprement dite.

II.5.2.3 Béton projeté

CHAPITRE II MÉTHODES DE RÉPARATION ET DE RENFORCEMENT

Un béton projeté est constitué d'un mélange de granulats, de ciment et d'eau avec parfois des ajouts, projetés grâce à l'air comprimé, sur une paroi. Il faut distinguer deux techniques de projection, suivant le moment d'introduction de l'eau dans la chaîne. (Fig II.1) Cette technique est employée par deux méthodes pour la projection du béton

a. Projection 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, ce qui a pour effet de diminuer l'émission de poussières.

b. Projection par voie mouillée

Le mélange de tous les constituants du béton, y compris l'eau, est introduit dans la machine à projeter. Le transport est effectué dans une canalisation, soit par un flux d'air comprimé pour la voie mouillée à flux dilué, soit par pompage pour la voie mouillée à flux dense.

Dans les deux cas, une injection d'air comprimé à la lance de projection est nécessaire pour accélérer la vitesse de projection. Le béton peut être fabriqué dans une centrale à béton de chantier ou une centrale de béton prêt à l'emploi.

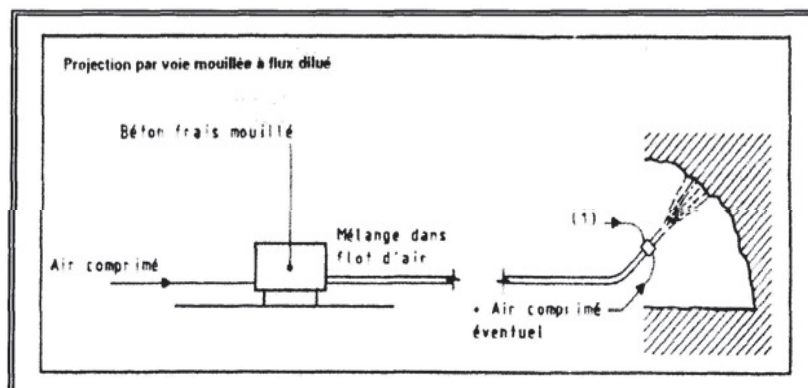


Fig.II.1 Technique de béton projeté

II.4.2.4 Renforcement par précontrainte extérieure

Cette technique permet la mise en œuvre et la conservation d'efforts de précontrainte appliqués à des ouvrages existants précontraints ou non dans le but de leur redonner l'état de service initial ou de leur donner un nouvel état de service.

II.4.3 Renforcement par placage des tôles d'acier

Le collage d'une plaque d'acier pour renforcer les poutres en béton armé est un procédé qui est utilisé depuis longtemps. Cependant, jusqu'à tout récemment, les études pour déterminer le comportement de telles poutres n'ont été que partielles.

II.4.4 Renforcement par l'adjonction de matériaux composites

Ce système de renfort est composé de deux produits : un adhésif de résine époxy et des lamelles de composite constituées de polymères renforcés de fibres de carbone enveloppés dans une résine époxy.

CHAPITRE II | MÉTHODES DE RÉPARATION ET DE RENFORCEMENT

Mis à part le matériau utilisé, cette méthode est analogue à celle des platines en acier.

Cette dernière technique est l'objet de notre étude ; elle sera traitée d'une façon plus détaillée dans le chapitre suivant

II.6 Conclusion

Les méthodes de réparation et de renforcement évoluent au cours du temps en utilisant des nouveaux matériaux plus résistants et plus performants tel que les matériaux composites

CHAPITRE III:

**RENFORCEMENT PAR
LES MATERIAUX
COMPOSITES**

III.1. INTRODUCTION

Pendant des siècles, sa sécurité dépendait de protections dures, massives donc lourdes. La notion de constructions légères et souples ne date que de quelques décennies ; Toute matière première comportant des charges peut être appelée au sens général composite. Par définition, un matériau composite est formé d'éléments très différents. C'est le résultat du mélange d'au moins deux composantes, différentes par leur nature, leur forme et leur fonction, et dont les performances globales sont supérieures à celles des éléments le constituant.

Les matériaux composites sont utilisés par l'homme depuis des millénaires dans le domaine de la construction. Le pisé de paille et d'argile est un des plus anciens matériaux dont l'idée première est exactement celle des composites : exploiter la résistance à la rupture des fibres, en laissant à une matrice de « qualité mécanique » inférieure le soin de maintenir ces fibres dans la forme voulue. Depuis des millénaires, l'homme a cherché à se protéger dans un bâtiment.

III.2 DEFINITION D'UN MATERIAU COMPOSITE

Un matériau composite résulte de l'association d'au moins deux matériaux non miscibles, dont les qualités se combinent avec synergie. Pour les composites plastiques, qui font l'objet de cette étude, les deux constituants sont :

- **Le renfort** : fibre minérale ou organique, qui constitue l'armature ou le squelette assurant la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité). Il ne faut pas confondre renforts et charges. Une charge apporte une propriété spécifique à la matière (par exemple, meilleure tenue à la température, voire abaissement du coût), alors qu'un renfort contribue uniquement à améliorer ses caractéristiques mécaniques face à des contraintes dynamiques. Pour cela, on utilise des renforts sous forme filamentaire allant de la particule allongée à la fibre continue.

La fibre renfort, pouvant comporter plusieurs milliers de filaments, apporte donc toujours la tenue mécanique de la structure composite.

- **La matrice** : À base de polymère ou résine organique ; lie les fibres renforts, répartit les efforts (résistance à la flexion ou à la compression) et assure la protection chimique en maintenant la forme du produit réalisé.
- **Des charges**, apportant des propriétés particulières ou complémentaires, et **des additifs spécifiques** : catalyseur, accélérateur de polymérisation sont utilisés (Fig. III.1).

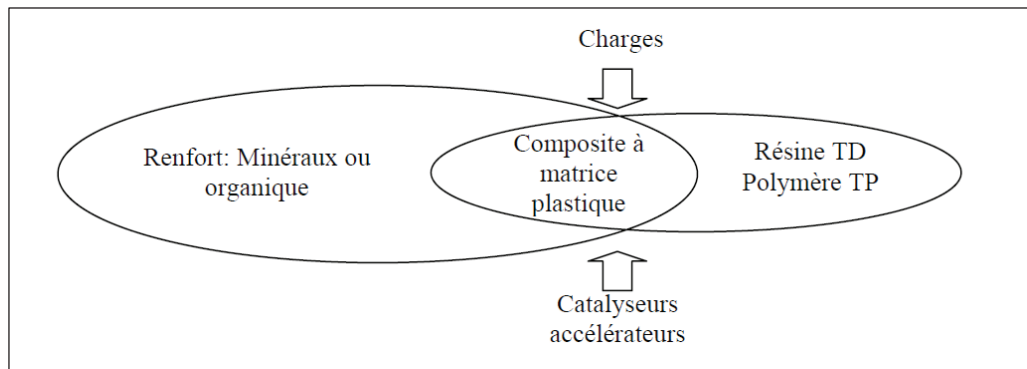


Fig III.1 Composants de base

III.3. Types des Composites

Il existe deux types de composites :

- **Les composites « de grande diffusion » GD** : a un taux de renforcement voisin de 30% (en masse).
- **Les composites « hautes performances » HP** : à base de fibres longues de verre, carbone, ou aramide et taux élevés de renfort, supérieurs à 50%

III.4 Polymères renforcés de fibres « PRF » :

Les matériaux composites en polymères renforcés de fibres « PRF » sont des produits de synthèse constitués principalement de renforts fibreux, supportés par un liant appelé matrice. Leur comportement dépend principalement du pourcentage de fibres et des propriétés mécaniques des constituants. Ce sont les renforts fibreux qui donnent aux composites leurs propriétés hautement directionnelles, leur imposant un comportement anisotrope et essentiellement linéaire élastique jusqu'à la rupture.

III.4.1 Avantages et inconvénients des PRF :

L'intérêt des utilisations des polymères renforcés de fibres dans le génie civil se trouve essentiellement dans :

- sa faible densité ;
- ses propriétés mécaniques longitudinales ;
- l'absence de corrosion ;
- sa très bonne tenue à la fatigue ;
- sa facilité de manipulation.

Les principaux inconvénients sont en contrepartie :

- 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.

CHAPITRE III RENFORCEMENT PAR LES MATERIAUX COMPOSITES

III.4.2 Les fibres :

Les fibres (renforts) contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet directif. Les propriétés des composites sont principalement influencées par le choix des fibres.

Parmi les fibres les plus connues en génie civil, on peut distinguer :

a) Fibre de verre

La fibre de verre constitue le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore).

Les caractéristiques essentielles de la fibre de verre sont données dans le tableau suivant

Tableau III.1 Caractéristiques essentielles de fibre de verre

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- rapport performances mécanique/prix- bonne résistance spécifique (pour verre R)- bonne adhérence avec toutes les résines- tenue à température élevée (50% de la résistance conservé à 350°C)- dilatation et conductivité thermiques faibles	<ul style="list-style-type: none">- faible module (par rapport à carbone ou aramide)- vieillissement au contact de l'eau

b) Fibre de carbone

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

- 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.

Les caractéristiques essentielles, avantages et inconvénients, de la fibre de carbone sont données dans le tableau

Tableau III.2 Caractéristiques essentielles de fibre de carbone

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- faible densité ;- propriétés mécaniques longitudinales ;- l'absence de corrosion ;- très bonne tenue à la fatigue ;- facilité de manipulation.	<ul style="list-style-type: none">- 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.

CHAPITRE III RENFORCEMENT PAR LES MATERIAUX COMPOSITES

c) Fibre d'aramide

La fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

- les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;
- la fibre haut module : employées dans le renforcement pour les composites de hautes performances.

Le tableau III.3 résume les propriétés des différentes fibres

Tableau III.3 : Propriétés des fibres [Les Matériaux Composites PRF pour le Confinement Externe du Béton]

Filament	Diamètre (µm)	Densité	Résistance à la traction (MPa)	Module de traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Température de fusion (°C)
Verre E	3 à 30	2,54	3 400	73 000	4,5	850
Verre D	3 à 30	2,14	2 500	55 000	4,5	–
Verre R	3 à 30	2,48	4 400	86 000	5,2	990
Carbone HR	8	1,78	3 500	200 000	1	2 500
Carbone HM	8	1,8	2 200	400 000	0,5	2 500
Aramide HR	12	1,45	3 100	70 000	4	480
Aramide HM	12	1,45	3 100	130 000	2	480

HR : haute résistance ; HM : haut module.

III.4.3 Les matrices:

La matrice lie les fibres renfort, répartit les efforts, donne la forme voulue et apporte la tenue chimique de la structure (dont le squelette est le renfort). On utilise surtout des résines thermodurcissables (TD) mais aussi, de plus en plus, des polymères thermoplastiques (TP)

- **Résine thermodurcissable (TD) :** c'est un polymère transformé en un produit essentiellement infusible et insoluble après traitement thermique (chaleur, radiation) ou physicochimique (catalyse, durcisseur). La transformation est irréversible ; en génie civil, les résines thermodurcissables (thermosets) sont utilisées presque exclusivement, telles que les matrices vinylesters, polyesters et époxy
- **Résine thermoplastique (TP) :** c'est un polymère pouvant être alternativement ramolli par chauffage et durci par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité. La transformation est réversible.

III.4.4 comportement de la fibre de carbone, la fibre de verre et les aciers :

Le comportement des fibres de (carbone et de verre) et de l'acier diffère, la courbe suivante présente courbe contrainte-déformation des trois matériaux cité ci-dessus :

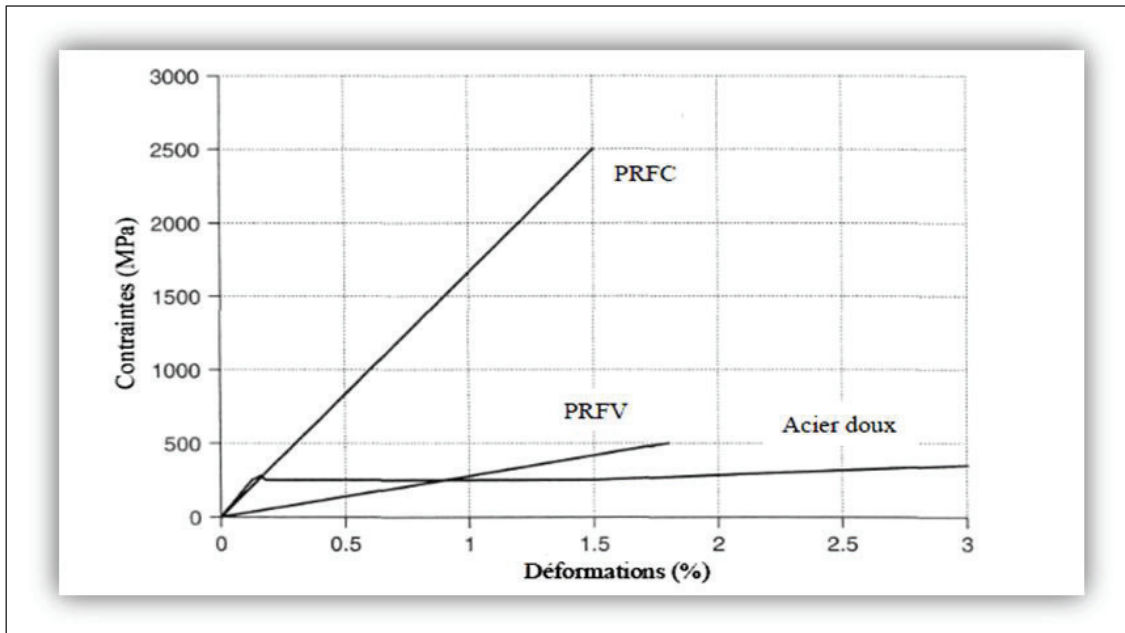


Figure III.2 : Courbes contrainte-déformation des PRFV, PRFC et des aciers doux [Les Matériaux Composites PRF pour le Confinement Externe du Béton]

A partir des observations faites sur ces courbes, on peut remarquer :

- que ces composites sont caractérisés par des relations contraintes-déformations linéaires.
- une différence entre le comportement fragile des composites «PRF» et le comportement ductile de l'acier doux, donne deux grandes conséquences structurales :
 - * Ces matériaux composites ne possèdent pas la ductilité des aciers, et leur fragilité va limiter le comportement ductile des éléments en béton armé renforcés par les composites «PRF». Néanmoins, lorsqu'on les utilise pour le confinement du béton, ces matières peuvent rehausser grandement la force et la ductilité des poteaux.
 - * L'implication du comportement fragile des composites «PRF» dans la redistribution des contraintes est restreinte à cause du manque de ductilité.

III.5. Procédés de mise en œuvre des renforts composites

III.5.1. Généralités sur les renforts composites

Plusieurs procédés de renforcement sont apparus au cours de ces dix dernières années. Les principaux utilisent directement les fibres de carbone sous forme de fil continu et d'autres font appel à un semi-produit plus ou moins sophistiqué tel que les tissus secs, les tissus préimprégnés ou des produits pultrudés.

a) Fibres sèches

La fibre de carbone est introduite sous forme de fibres continues de très grande longueur. Elle est déposée et enroulée régulièrement autour d'un mandrin.

Le poids des bobines varie de 500g à 4 kg, ce qui correspond à des longueurs de fibres continues de 600 m à 5 Km (soit 0,8g au mètre linéaire).

Pour renforcer directement une structure à partir d'une bobine de fibre de carbone, il est nécessaire de pouvoir tourner autour ; ce procédé de renforcement est donc naturellement limité aux colonnes ou aux pylônes. Les bobines sont placées sur un dévidoir qui peut se mettre en mouvement dans deux directions (rotation autour de la structure à différentes hauteurs). Lorsque l'ensemble se met en mouvements, les mèches de carbone sont extraites des bobines et elles sont déposées automatiquement par enroulement autour du support à renforcer préalablement enduit d'une résine.

b) Tissus secs

Les fibres de carbone permettent, comme beaucoup de fibres longues de fabriquer des tissus de toutes formes et de toutes tailles, de même que des matrices. Le renforcement de structures à partir d'un tissu sec tissé uni ou multidirectionnel se fait directement par la pose de ce dernier sur une couche de résine qui recouvre l'élément à renforcer et qui sert de liant.

Après une couche de résine de fermeture permet de parfaire l'imprégnation. Les pressions nécessaires appliquées pour cette méthode de renforcement sont faibles.

Par rapport à d'autres méthodes de renforcement, son principal avantage est une manipulation très facile sur chantier avec une absence totale de matériel lourd à déplacer. En plus, cette technique permet le suivi parfait de la forme du support et la maîtrise de l'épaisseur du film de résine.

c) Tissus préimprégnés :

Les tissus préimprégnés sont obtenus en usine, à partir de tissus secs (cas des tissus multidirectionnels) ou à partir de fils de carbone joints sous forme de nappe (cas des tissus unidirectionnels), sur lesquels est déposé un excès de résine. L'excès de résine est éliminé par passage entre des rouleaux chauffés ou non. Le produit avant utilisation doit être conservé à froid, généralement -18°C , pour éviter la polymérisation de la résine.

Les tissus doivent être ramenés à la température ambiante pour être utilisables. A température ambiante, la souplesse du tissu préimprégné permet la pose de renforcements sur pratiquement n'importe quel type de surface. Ces renforcements sont posés et leur matrice immédiatement polymérisée sur les surfaces à renforcer ; le principal problème d'un tel renfort réside dans la phase de remontée à la température ambiante et dans les difficultés matérielles pour assurer de bonnes conditions de polymérisation sur chantier.

Les premières résines utilisées nécessitaient un matériel important, car la polymérisation était obtenue sous vide ou sous pression à des températures supérieures à 100°C . Par contre le principal avantage de cette méthode était la quasi-absence de bulles dans le renfort en composite après polymérisation. Cette technique de renforcement a surtout été développée au Japon, dès la fin des années 1980. Depuis, les fabricants de tissus préimprégnés et les

formateurs de résines ont accompli des progrès considérables. La température de polymérisation des résines est voisine de la température ambiante, ce qui a permis un gain d'exploitation très important. Cependant, l'utilisation d'un préimprégné nécessite toujours une phase de conservation à très basse température et une phase de remontée en température avant la pose, qui sont difficiles à gérer sur des chantiers de travaux publics.

d) Produits pultrudés

Ces produits sont obtenus à partir de mèches de fibres continues qui sont enduites par passage en continu dans un bain de résine. Ces résines peuvent être de type époxyde, polyester, vinylester ou phénolique. L'ensemble des mèches préimprégnées passe ensuite dans une filière où l'excès de résine est éliminé, puis dans un four de polymérisation. Les produits finis se présentent sous forme de bandes ou de joncs, plus ou moins rigides suivant les épaisseurs et les diamètres.

La section des bandes les plus courantes est 100*1 mm, leur longueur, suivant la demande, varie de quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres. D'autres types de profilés, y compris des tubes, peuvent être aussi fabriqués par le même procédé, ces produits sont utilisés depuis très longtemps dans les articles de sport : flèches d'arcs, bâtons de ski.

Ce procédé a l'avantage d'être continu, automatisé, rapide et donc de réduire le coût du composite. Il permet aussi de maîtriser les taux de fibres et de résine, et d'obtenir des formes profilées recherchées pratiquement de toutes les longueurs désirées. A partir de ces bandes pultrudées, la technique de renforcement est similaire à celle du plat collé métallique, selon le procédé l'Hermite, mis au point en France vers 1965. Elle a démarré conjointement au Japon et en Europe, plus exactement en Suisse, à l'EMPA de Dübendorf à la fin des années 1980 sous la direction du Professeur U.Meier. L'avantage de cette méthode est la facile extrapolation des résultats obtenus par le collage de tôles d'acier.

Comparée pour la technique utilisant l'acier, cette technique de renforcement permet de travailler avec des produits légers (1/5 de la densité de l'acier) ; elle a aussi l'avantage de nécessiter une pression de collage limitée et élimine les phénomènes d'oxydation. Cependant, l'utilisation de cette technique, comme celle du plat collé métallique, permet difficilement de maîtriser les épaisseurs de colle, en raison de la rigidité des aciers et des composites. L'application de ces renforcements sur des surfaces ayant des défauts de planéité ou sur des surfaces courbes ou non développables reste très limités. Dès les années 1980, des recherches ont démarré au Japon pour étudier le remplacement des structures en acier, formées de câbles toronnés et de treillis, par des structures résistant à l'oxydation. Les composites, à base de fibres de verre, d'aramide ou de carbone, se sont avérés d'excellentes solutions pour ce remplacement.

III.5.2 Notion de multicouches composites pour la réparation des ouvrages

Comme le montre la Figure III.3, la conception du système multicouche composite a pour objectif de remplir plusieurs fonctions :

- rendre sain l'état de surface de la couche support (béton) en cherchant à éliminer les fissures, soit par injection de polymère, soit par application d'un produit (mortier) de ragréage ;

CHAPITRE III | RENFORCEMENT PAR LES MATERIAUX COMPOSITES

- Eliminer les défauts géométriques (planéité, effet d'angles) de la surface à réparer pour minimiser les problèmes ultérieurs de délaminage ou de décollement ;
- Appliquer une couche de polymère (primaire) entre le support et le composite pour améliorer l'adhérence ;
- Appliquer un nombre de couches de matériaux composites suffisant pour assurer la stabilité de l'ouvrage ;
- appliquer une couche de finition (Gel-Coat, protection) pour assurer une bonne tenue à la corrosion et aux ultraviolets ; procéder à un placage de feuilles de placoplâtre ou à la projection de couches à fort taux de charges minérales pour améliorer la tenue au feu et en température du système

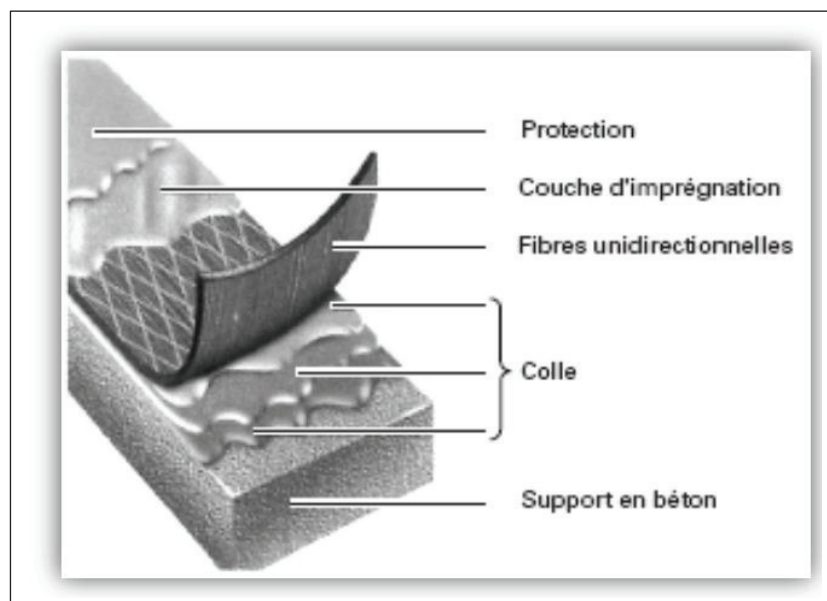


Fig III.3 Conception du système multicouche [Les Matériaux Composites PRF pour le Confinement Externe du Béton]

III.6 Conclusion

Les principales raisons qui ont conduit les fibres de carbone à se développer dans le renforcement des bâtiments et des ouvrages d'art sont :

- Le renforcement ou la mise en conformité des ouvrages existants, soit pour des raisons de perte des propriétés initiales, soit pour des raisons de remise à niveau liées à de nouvelles normes
- La construction de nouveaux bâtiments et d'ouvrages d'art plus légers et plus performants.

CHAPITRE IV :

ETUDE

EXPERIMENTALE

IV.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on présente l'objectif de l'étude expérimentale, les matériaux utilisés et les essais réalisés, les appareils de mesure et le dispositif d'essai y sont aussi détaillés. Les essais sont réalisés avec le matériel et les matériaux fournis par le laboratoire génie civil de l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP Alger).

IV.2 Objectifs de l'étude expérimentale

Le principal objectif de cette recherche est d'examiner expérimentalement les effets de l'amélioration de la capacité des éprouvettes cubiques en béton confinée soumises à une compression axiale de charge par chemisage avec PRFC.

L'étude expérimentale consiste à :

- évaluer l'efficacité de renforcement en fibres de carbone externes pour des éprouvettes cubiques (15x15x15) cm
- évaluer l'effet du nombre de couches de PRFC sur la résistance à la rupture et la ductilité du béton confiné
- évaluer l'effet de la force de compression sur l'efficacité du renforcement par la fibre de carbone PRFC
- étudier la déformation à la rupture effective circonférentielle PRFC et l'effet de la pression latérale efficace de confinement.

IV.3 Matériaux Utilisés

IV.3.1 Le Ciment

Le ciment utilisé pour la composition du béton destiné à la confection des éprouvettes cubiques (15cm x15cm x15cm), est un ciment portland

- Ciment Portland CPA CEM II R32.5 Mpa pour la première formulation ;
- Ciment Portland CPA CEM I R42.5 Mpa pour la deuxième formulation ;

Les ciments CPA-CEM II/A contiennent :

- 80% à 94% de clinker (K).
- Un complément à 100% composé d'un ou plusieurs des constituants, pouzzolane (Z), calcaire (L), etc.
- Des sulfates de calcium sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.
- La teneur en chlorures (Cl) est inférieure à 0,10%

IV.3.2 Les granulats

Les granulats utilisés pour les éprouvettes de béton sont les suivants :

Agrégats : gravier de carrière 8/15, gravillon de carrière 3/8, et sable de rivière 0/5, avec :

- La courbe granulométrique

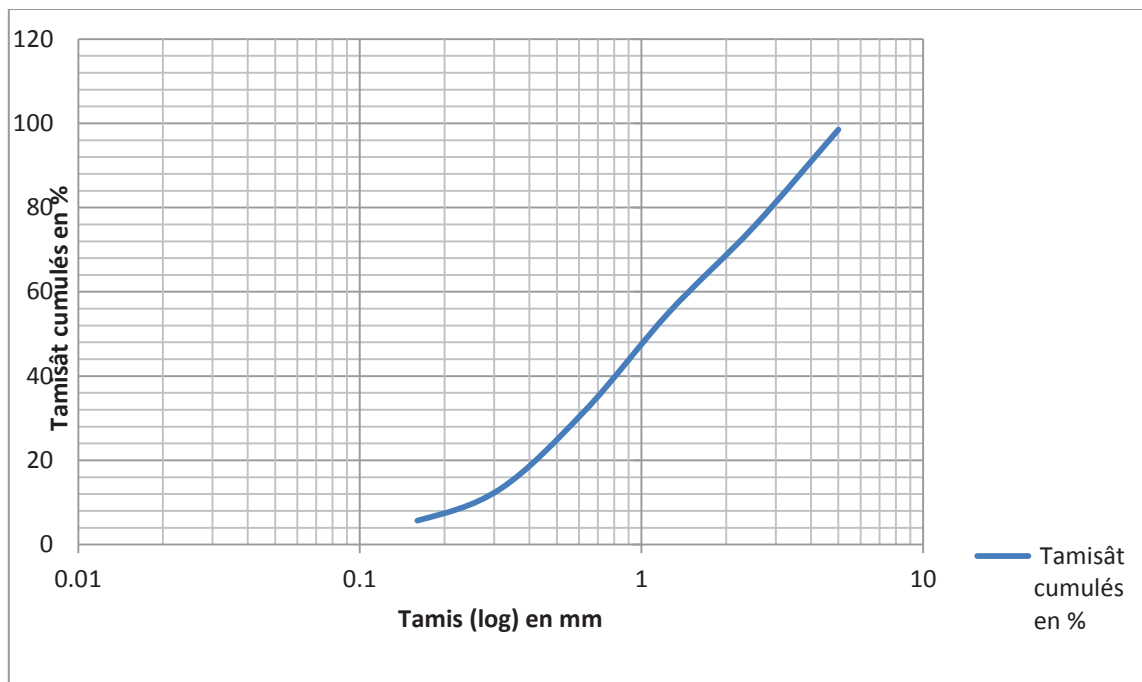


Fig IV.1 la courbe granulométrique des granulats utilisés [TP MDS Ecole Nationale Polytechnique]

- Un module de finesse $M_F = 2,6$ ($2,2 < 2,6 < 2,8$) donc notre granulat est bon pour le béton

IV.3.3 L'eau

L'eau de gâchage utilisée pour la confection du béton est de l'eau potable du robinet sans traitement supplémentaire.

Cette eau de gâchage est nécessaire pour l'hydratation du liant, le mouillage des granulats et la facilité de mise en place du béton.

- **Les différentes compositions des deux bétons**

Le tableau IV.1 représente les différentes compositions des deux bétons

Tableau IV.1 les différentes compositions du béton

Composition n°	I	II
Résistance visée à la compression a 28j f_{c0} (MPa)	25	35
Ciment (Kg/m^3)	280	400
L'eau (l/m^3)	151,20	183.86
Gravier concassé		
Φ 3/8	122.90	115.70
Φ 8/15	258.20	243.00
Sable Φ 0/5	729.10	686.30
Teneur en air %	2.30	2.50
E/C	0.54	0.46

IV.3.4 la fibre de carbone utilisée

Les feuilles de fibres de carbone utilisées dans cette étude étaient le produit SikaWrap-230C, un enveloppement unidirectionnel. Les propriétés sont mentionnées dans le tableau IV.2

Tableau IV.2 propriétés du tissu de fibre de carbone [fiche technique]

Résistance à la traction	4300 MPa
Module de traction E_{PRFC}	238Gpa
Allongement ultime $\epsilon_{t,rupt}$	14%
Epaisseur de la feuille t	1 mm

IV.3.5 système de résine

Le système de résine qui a été utilisé pour lier les tissus de carbone sur les cubes était la résine époxy en deux-pièces, de la résine et le durcisseur. Le rapport de mélange des deux composants en poids est de 1/4. Les propriétés de la résine sont indiquées dans le tableau IV.3 (les données sont fournies par le fabricant). SikaWrap-230C était domaine laminé en utilisant Sikadur-330 époxy pour former une enveloppe en fibre de carbone utilisée pour renforcer les échantillons de béton.

Tableau IV.3 propriétés de la résine époxy [fiche technique]

La densité	1.3 à 20°C
Allongement ultime	0.9% après 7jours à 23°C
Résistance à la traction	30MPa après 7 jours à 23°
Module de traction	4500MPa après 7jours a 23°C
Module de flexion	3800MPa après 7jours a 23°C
Température de résistance	Exposition continue jusqu'à 50°C

IV.4 Préparation des échantillons :

Le programme expérimental a été mené dans le laboratoire génie civil de l'Ecole Nationale Polytechnique. Deux séries d'expériences ont été effectuées pour étudier le comportement des cubes. Les éprouvettes cubiques ont la dimension de (15cmx15cm x15 cm)

Après 28 jours de cure, les couches de PRFC ont été appliquées à la main sur les cubes avec une résine époxy. Le système de résine utilisée a été réalisé en deux parties, à savoir, résine et durcisseur. Les composants ont été soigneusement mélangés pendant au moins 3 min. Les cubes de béton ont été nettoyés et séchés complètement avant que la résine a été appliquée. La résine époxy Sikadur-330 mélangé a été directement appliquée sur le substrat, et en fin on place Le tissu avec précaution

Le rouleau a été utilisé en continu jusqu'à ce que la résine a été réfléchi sur la surface du tissu, une indication de mouillage complet. Après l'application de la première spire de la fibre de carbone, une deuxième couche de résine a été appliquée sur la surface de la première couche pour permettre l'imprégnation de la deuxième couche de la fibre de carbone. La troisième couche est faite de la même façon. Enfin, une couche de résine a été appliquée sur la surface des cubes. La dernière couche PRFC a été enroulée autour du cube avec un

CHAPITRE IV | ETUDE EXPERIMENTALE

recouvrement de 5 cm pour éviter de glisser ou décollement de fibres lors des essais et pour assurer le développement de la force composite complet.

Les éprouvettes cubiques enveloppés ont été laissés à température ambiante pendant une semaine pour la résine époxy pour durcir adéquatement avant le test.



Fig IV.2 Epreuves Témoins

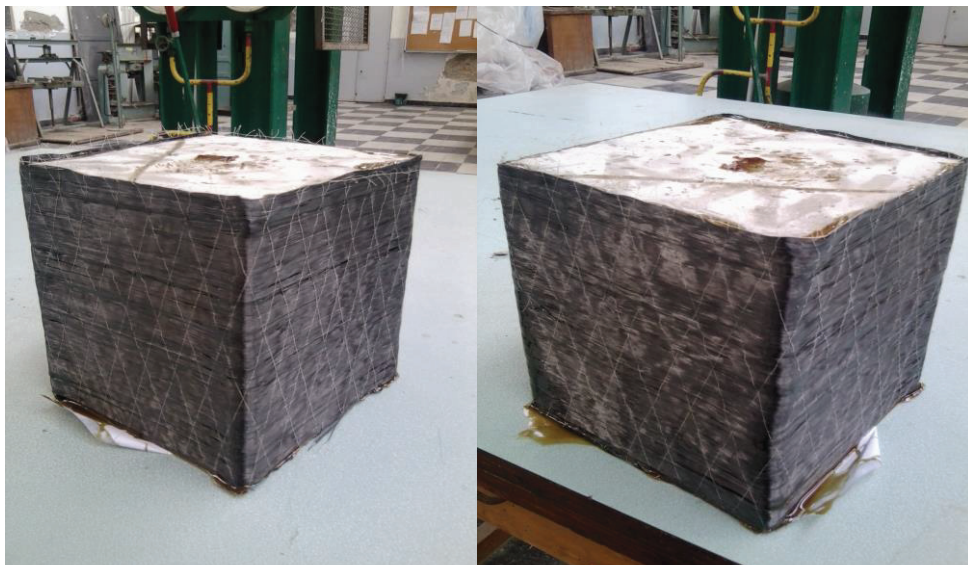


Fig IV.3 Epreuves après Renforcement

IV.5 Procédures d'essai

Les échantillons ont été chargés sous une charge de compression uni-axiale monotone jusqu'à la rupture. La charge de compression est appliquée à un taux correspondant à 0,5 MPa / s.

Avant l'essai, tous les cubes de PRFC gainé ainsi que les cubes en béton non armé, ont été bouchés avec du mortier de soufre aux deux extrémités.



Fig IV 4. Mise en place des éprouvettes

Conclusion

La Fibre de carbone améliore la capacité des éprouvettes cubiques.

Plus le nombre de couches de la fibre de carbone est élevé plus la résistance a la compression est grande.

Les résultats et interprétations seront présentés dans le chapitre suivant

CHAPITRE V :

RESULTATS ET INTERPRETATION

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, les résultats de l'étude expérimentale réalisée sur les éprouvettes décrits au chapitre précédent sont présentés.

La rupture des éprouvettes a été considérée comme étant le moment où l'éprouvette n'a plus la capacité de recevoir une augmentation supplémentaire de la charge. En d'autres mots, le moment de rupture est l'instant où la charge appliquée est maximale d'où on fait sorte la résistance maximale de l'éprouvette.

V.2 Observation (mode de défaillance)

Il s'agit de quatre éprouvettes témoins en béton désignées par E25, E25', E35, et E35'. Elles sont chargées jusqu'à la rupture totale. Plusieurs mesures ont été prises lors des essais à l'aide des comparateurs de résistance.

Pour Les éprouvettes renforcées on remarque que, jusqu'à une charge de (30Mpa pour la 1ere formulation et 40 Mpa pour la 2eme formulation) aucune fissure n'apparaît et l'éprouvette reste presque intacte.

À une charge de 32 Mpa (pour la 1ere) et 48 Mpa (pour la deuxième formulation) le début d'apparition de fines fissures inclinées sur les quatre côtés. Dans ce cas aussi on a remarqué l'arrachement du tissu à ses extrémités.

Principales propriétés mécaniques obtenues à partir des valeurs moyennes de deux essais de compression axiale sont résumées comme suit :

Tableau IV.4 la résistance à la compression a 28j des éprouvettes témoins

Composition de béton n°	Résistance à la compression a 28 j (MPa)
I	24,18
II	33,27

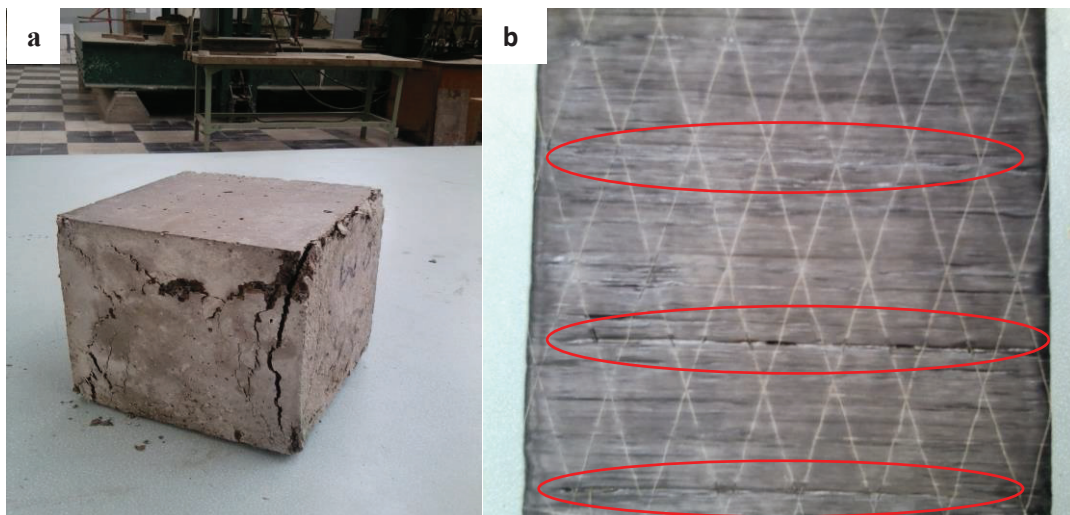


Fig V.1 mode de rupture des éprouvettes témoins et renforcées par la fibre de carbone

a) $f'_{c0} = 24,18$ MPa

b) $f'_{c0} = 32,48$ MPa

CHAPITRE V | RESULTATS ET INTERPRETATIONS

V.3 les Résultats :

Tableau V.1 valeur moyenne des résultats expérimentaux

Composition de béton visée	Code	f'_{c0} (MPa)	f'_{cc} (MPa)	f'_{cc}/f'_{c0}
I (25MPa)	0 couche	24,18	24,18	1
	1 couche		32,48	1,34
	3 couches		50,84	2,10
II (35MPa)	0 couche	33,27	33,27	1
	1 couche		48,67	1,46
	3 couches		76,13	2,29

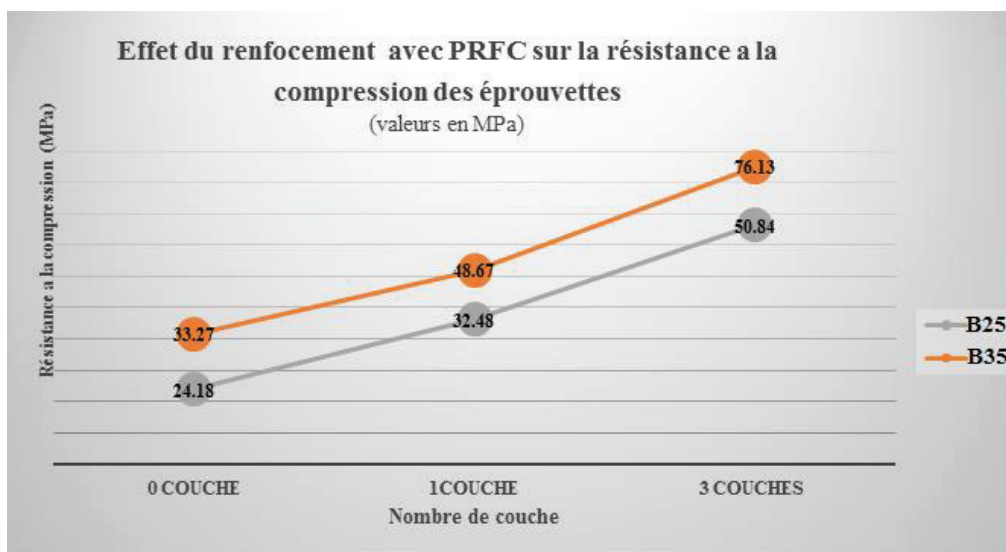


Fig V.2 courbe de l'évolution de la résistance à la compression des éprouvettes renforcé

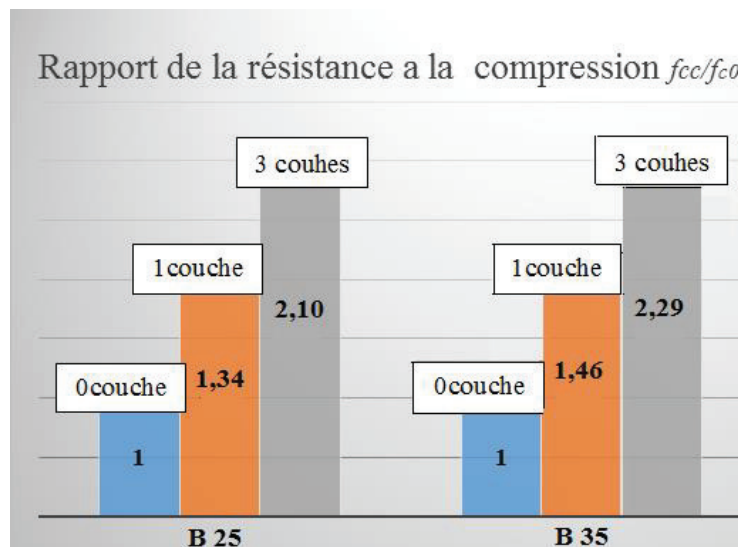


Fig V.3 graphe montre le rapport f'_{cc}/f'_{c0} pour les deux bétons

V.4 Interprétations des résultats :

- ✓ Le renforcement est destiné à améliorer la résistance des éprouvettes vis-à-vis de la compression.
- ✓ L'utilisation de tissu de fibres de carbone collé sur les faces des éprouvettes permet de la renforcer et de la rigidifier.
- ✓ Le comportement mécanique des éprouvettes cubiques renforcées par PRFC- était très similaire dans chaque série en termes de contrainte et de modes de rupture.
- ✓ Le résultat (moyenne des valeurs) figurant dans le tableau V.2 montre que le tissu du PRFC améliore considérablement les résistances ultimes des éprouvettes.
- ✓ Les contraintes et les déformations ultimes augmentent en fonction du nombre de couches du matériau composite.
- ✓ Pour les éprouvettes de composition de béton I (25 MPa) l'échantillon renforcé par une et trois couches de matériau composite présentent une augmentation de 134% et de 210% respectivement en termes de résistance à la compression et la contrainte axiale par rapport à l'échantillon de référence,
- ✓ Les éprouvettes de composition de béton II (35 MPa) l'échantillon renforcé par une et trois couches de matériaux composite présentent une augmentation de 146% et de 229% respectivement
- ✓ Plus le nombre de couches du PRFC est élevé, plus la résistance à la compression est grande.

CONCLUSION

CONCLUSION

GENERALE

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'étude expérimentale avait pour objectif de renforcer des éprouvettes de type béton non armé en utilisant un matériau composite (la fibre de carbone). Des éprouvettes de section carrées ont été fabriquées et testées au sein du Laboratoire de génie civil de l'ENP, afin d'analyser leurs comportement en compression.

Cette étude expérimentale a montré les effets bénéfiques des matériaux composites sur le comportement des éprouvettes renforcées soumises à la compression axiale. Les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette étude :

- ✓ L'influence des paramètres suivants sur le comportement et la performance des éprouvettes confinées avec des matériaux composites « PRFC »
 - La résistance en compression du béton non renforcé f_{c0}
 - Le nombre de couche du tissu de fibre de carbone PRFC.

Sur la base de l'analyse des résultats expérimentaux, les conclusions suivantes sont effectuées :

- ✓ Les résultats expérimentaux démontrent clairement que l'emballage composite améliore la performance structurelle des colonnes en béton sous charge axiale, tant en termes de force maximale et la déformation. En général, l'efficacité de confinement diminue avec une augmentation de la résistance du béton en milieu ouvert.
- ✓ Les forces et les contraintes augmentent considérablement avec le nombre de couches composites.
- ✓ Le défaut de tous les cubes confinés est marqué par la rupture fragile de fibres de carbone.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [01] **H. CHALAYE**, « *Les matériaux composites* », Edition Hermes, 1994.
- [02] **M. REYNE**, « *Technologie des composite* », Edition Hermes, 1995.
- [03] **J. LUYCKY**, "*Composites à fibre de carbone dans le génie civil*", Technique de l'ingénieur, Vol C5, 2000.
- [04] **C. CANCEIL, M. KHEMAKHEM et A. BOULILA**, « *Le renforcement des ouvrages à risques par des lamelles et tissus en fibres de carbone* », Colloque international : les risques en génie civil, ISET de Sfax et AIT, Tunisie, pp 70-80, Mars 2004.
- [05] **Mokhtar Ahmed Amine**, «Influence du renforcement par matériaux composites à base de fibres de carbone 'CFRP' sur les performances de trois bétons », Mémoire de Master, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, Novembre 2014.
- [06] **A. BOUDJAKDJI et A. LAICHAOUI**, « *Renforcement des poutres en béton armé soumises à la flexion par matériaux composites* », Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2003.
- [07] **P. HAMELIN**, « *Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites* », Technique de l'ingénieur, Vol AM5, 2000.
- [08] **J A. GALGARO et R. LACROIX**, « *Projet de renforcement ou de réparation d'un pont* », Vol C4, Technique de l'ingénieur, 2000.
- [09] **M. ABDESSEMED**, « *Comportement des poutres isostatiques en béton armé renforcées par tissu et lamelle de fibre de carbone* », Mémoire de magister, Université de Blida, 2003.
- [10] **J-M. BERTHELOT**, « *Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures* », Edition Masson, 1992.
- [11] **M. CHATAIN**, « *Matériaux composites présentation générale* », Techniques de l'ingénieur, Vol AM5, 2000.
- [12] **FREYSSINET INTERNATIONAL**, *Fiche technique, référence FTF 0021*, « *Renforcement structurel avec du TFC* », 2001.
- [13] **CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES-SIKA**, « *SIKACARBODUR- SIKAWRAP –CCT n°37* », enquête technique SOCOTEC n° HX 0823, Février 2006.
- [14] **Riad BENZAID, Habib Abdelhak MESBAH et Nasr-eddine CHIKH**, «*Les Matériaux Composites PRF pour le Confinement Externe du Béton*», Janvier 1994.