

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Magister

Présenté à l'Université de Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil et Hydraulique
Option : Sols, structures et hydraulique

Par : Mekersi Yacine

**Thème : Comportement des pièces comprimées en béton
renforcées par matériaux composites**

Sous la direction de : Pr. GUENFOUD Mohamed

JURY

Dr : Benmarce A.	Université de Guelma	Président
Pr : Guenfoud M.	Université de Guelma	Rapporteur
Dr : Cherait Y.	Université de Guelma	Examineur
Dr : Benouis A.H.	Université de Guelma	Examineur

2011

Table des matières

REMERCIEMENTS

ملخص

RESUME

ABSTRACT

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1 INTRODUCTION.....	3
I-2 PATHOLOGIE DU BETON.....	4
I-2.1. Principales causes de dégradation des bétons.....	4
I-2.2. Origine des dommages dans les structures en béton	5
I-2.3. Pathologies d'origine chimique	5
I-2.3.1 carbonatation et corrosion des aciers	5
I-2.3.2 réaction sulfatique	6
I-2.4. Pathologies d'origine physique	6
I-2.4.1 retrait	6
I-2.4.2 gel dégel	7
I-2.5. Pathologies d'origine mécanique	7
I-2.5.1 les chocs	7
I-2.5.2 délamination	7
I-3. REPARATION DES OUVRAGES EN BETON	8
I-3.1. Méthodes de réparation	8
I-3.2 Réparation d'ouvrage par matériaux composites	9
I-3.2.1 introduction.....	9
I-3.2.2 les matériaux	10
a) introduction	10
b) les fibres	11
c) les renforts.....	15
d) caractéristiques moyennes des fibres et renforts.....	16
e) les résines epoxydiques.....	18
I-4. LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE MISE EN ŒUVRE	19
I-4.1 mise en œuvre par enroulement filamenteuse.....	19
I-4.2 mise en œuvre par stratification direct de tissu sec	19
I-4.3 le collage de plaques composites.....	20

I-5 PROBLEMES LIES A L'UTILISATION DES COMPOSITES	22
I-5.1 introduction	22
I-5.2 Problèmes liés à l'interface béton composite	22
I-5.3 durabilité des structures renforcées	23
I-6. APPLICATION DES COMPOSITES DANS LA CONSTRUCTION EN GÉNIE CIVIL.....	25
I-6.1 Utilisation des barres de FRP pour la fabrication des poutres en béton armé.....	25
I-6.2 Utilisation de barre de FRP pour les ancrages souterrains	26
I-6.3 Réhabilitation des structures à l'aide de FRP.....	29
I-6.4 Réhabilitation des colonnes.....	30
I-6.5 Réhabilitation des murs.....	30
I-6.6 Réhabilitation des dalles.....	31
I-6.7 Réhabilitation des poutres	33
I-7 CONCLUSIONS	34
I-8 POSITION DU PROBLÈME.....	35
I-8.1 Etude expérimentale.....	36

CHAPITRE II : Influence du renforcement sur le comportement en compression des pièces en béton

II-1.ESSAI DE COMPRESSION DU BÉTON.....	37
II-1.1.Introduction.....	37
... II 1.2. Propriétés du béton	38
... II 1.3. Béton en compression.....	38
... II 1.4. Préparation des éprouvettes d'essais.....	45
a- Mesure de la densité à l'état frais.....	45
b- Mesure de la résistance à la compression.....	48
c- Comportement en compression des pièces en béton.....	48
▪ Epreuves témoins sans renforcement.....	48
▪ éprouvettes témoins avec renforcement.....	49
II.1.5.Matériaux composites	50
II .1.6.la résine.....	50
▪ Préparation de la résine d'imprégnation (colle).....	50
II.1.7 .Renforcement des éprouvettes témoins par le tissu fer carbone(TFC).....	51

II.1.7 .1 Courbes charges/ temps du béton jusqu'à rupture avec une seule couche.....	52
II.1.7 .2 Courbes charges/ temps du béton jusqu'à rupture avec deux Couches.....	53
II.2.CONCLUSIONS.....	55

CHAPITRE III : Comportement des pièces pré chargées et renforcées

III-1. INTRODUCTION	56
III-2 PREPARATION DES EPROUVETTES EGRADEES.....	57
III-2-Préchargement.....	57
III-2-2renforcement par recouvrement en matériaux composite (TFC).....	58
III-3- COMPORTEMENT DES EPROUVETTES PRES CHARGEES A (30%) PUIS RENFORCEES PAR TFC	58
III-3-1Eprouvettes pré chargées	58
III-3-2 Eprouvettes pré chargées puis renforcées par TFC (une seule couche).....	59
III-3-3 Eprouvettes pré chargées puis renforcées par TFC (deux couches).....	60
III-4- COMPORTEMENT DES EPROUVETTES PRES CHARGEES A (60%) PUIS RENFORCEES PAR TFC	61
III-4-1Eprouvettes pré chargées.....	61
III-4-2 Eprouvettes pré chargées puis renforcées par TFC (une seule couche).....	61
III-4-3 Eprouvettes pré chargées puis renforcées par TFC (deux couches).....	62
III-5- MODE DE RUPTURE	63
III-5-1 Eprouvettes prés chargées à (30%) puis renforcées par TFC..	63
III-5-2Eprouvettes prés chargées à (60%) puis renforcées par TFC...	65

III6.CONCLUSIONS.....	68
------------------------------	-----------

VI-CONCLUSION GENERALE.....	69
------------------------------------	-----------

Références bibliographiques.....	71
Listes des figures	73
Annexe A	76
Annexe B	77

VI-CONCLUSION GENERALE.....	69
Références bibliographiques.....	71
Listes des figures	73
Annexe A	76
Annexe B	77

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à monsieur le professeur Mohamed GUENFOUD pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce projet de recherche.

Je le remercie sincèrement pour avoir accepté d'être mon encadreur et pour m'avoir prodigué des conseils précieux tout au long de mon travail.

J'adresse mes vifs remerciements à l'ensemble «Des professeurs de l'année théorique» :

Nouaouria M/salah , Benmalek M/larbi, Guenfoud Mohamed, Benmarce A/aziz,

Belabed lazhar , Benouis A/halim, Cherait Yacine, , Mansouri Rachid ,Ahouche Jamel et Moussaoui A ,

à la fois, pour la qualité de leurs enseignements, pour leurs critiques mais aussi pour leurs encouragements.

Je remercie respectueusement le président Mr Benmarce A/aziz et les membres du jury Mr Cherait Yacine et Mr Benouis A/halim qui me font l'honneur d'évaluer et d'apprécier mon travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail,

A mes parents, a mes frères Scander et Samir, à mes beaux parents, pour leur appui inestimable.

A mon épouse et à mes enfants Kenza et Anis, pour leur patience et leur tendre compréhension.

A ma belle sœur Asma pour son affectueuse complicité.

A mon ami Kamel, à qui je témoigne ma fraternité et ma reconnaissance pour son indéfectible soutien et sa disponibilité continue.

A mes « deux chers Abderrezak » pour m'avoir toujours supporté.

ملخص

تبعاً للتأثيرات الحدية –(زلازل، صدمات ...)، تتدهور الخرسانة في المنشآت ، ولهذا يصبح تعزيز هذه العناصر الحل الأفضل والأفضل
إن التقنية الجديدة الخاصة بتعزيز الخرسانة: تتمثل في استعمال مواد مركبة(نسيج من ألياف الكربون TFC) هذه الأخيرة تستعمل في مجال إصلاح وترميم المنشآت الخرسانية
من خلال هذا العمل ن نقدم دراسة تجريبية على مجموعتين من عينات خرسانية .
في المجموعة الأولى ، عززت العينات بمواد مركبة(TFC) التي ألصقت بمادة(époxy) ثم أخضعناها للإنتضاغاط البسيط.
في المجموعة الثانية، أخضعنا العينات إلى تحميل مسبق بدرجات مختلفة، ثم عززت بإحتوائها بمادة مركبة(TFC) .
وقد أظهرت النتائج بوضوح تأثير مركب (TFC) على العينات التي شهدت زيادة معتبرة في قدرة تحملها.

المادة:

هياكل، التربة و الري

الكلمات الرئيسية

الخرسانة، التدهور، التعزيز، المواد المركبة، الانضغاط..

مخبر الاستقبال:

مخبر الهندسة المدنية والري ، جامعة 8 ماي 45 ، قالمة.

RESUME

Suite aux sollicitations extrêmes, telles que le séisme, les chocs, les explosions, etc., le matériau béton subit des dégradations importantes au niveau des structures, c'est pourquoi, le renforcement des éléments porteurs en béton devient souvent, la solution la plus adéquate.

Le renforcement du béton par confinement par un renfort en matériaux composites (tissu de fibre de Carbone TFC) constitue une nouvelle technique de réparation et de restauration de structures en béton armé.

A travers ce travail, nous présentons les résultats d'une étude expérimentale portant sur l'incidence du renfort de type TFC sur la résistance en compression monoaxiale d'éprouvettes en béton dégradées.

L'ensemble des résultats a mis clairement en évidence l'influence du composite particulièrement sur la capacité portante de l'éprouvette qui a connu une augmentation considérable.

DISCIPLINE :

Sols, structures et hydraulique

MOTS-CLES :

Béton, dégradation, renforcement, Compression, Matériaux composites, TFC

LABORTOIRE D'ACCUEIL :

Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique, Université 08 Mai 45, Guelma.

ABSTRACT

Concrete decreases in the structures after violent shocks such as earth quakes.

This is why the most appropriate solution is to support the concrete parts.

The strengthening of the concrete by confinement consists of using compound and mixed materials known as composites (CFT) is a new technique.

This technique is used in the repairing and restoration of concrete structures.

In this work, we introduce an experimental study led in two types of concrete recipients.

In the first one the recipients are supported by composites made of carbon fibers mixed with “Epoxyd resine” then compressed in a uni-axial movement.

In the second type the recipients are pre-charged at different levels then supported by confinement in composites.

The whole results have shown the composite influence especially on the holding capacity of the recipient which has recorded a noticeable increase.

DISCIPLINE :

soil ,Structure and hydraulics

KEY WORDS :

Concrete, decreases , compression , composite ,.strengthening.

HOME LABORATORY

Laboratory of Civil Engineering and Hydraulics, University 08 May 45, Guelma

Introduction générale

Un ouvrage de génie civil est dimensionné pour une durée de vie pré déterminée. Toutefois, plusieurs types de désordres peuvent réduire cette durée de vie prévisionnelle et aujourd'hui, un ouvrage sur trois [E1] nécessite une maintenance pour assurer la sécurité des usagers.

La maintenance des ouvrages consiste à les protéger en assurant une meilleure étanchéité ou en limitant la corrosion, à les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance dues à la fissuration, à les renforcer en améliorant les performances et la durabilité des ouvrages [C1]. C'est un problème de plus en plus préoccupant dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est de plus en plus élevé et les conditions de réparation de plus en plus difficiles.

Parmi les techniques disponibles, l'une des plus efficaces est la réparation des structures en béton armé dégradées par plaquage extérieur en acier [L1]. Toutefois, les difficultés de manipulation des plaques en acier (compte tenu de leur poids), ainsi que les problèmes de corrosion constituent un inconvénient majeur de cette solution.

Depuis une dizaine d'année, une alternative est proposée : renforcer ou réparer les ouvrages en béton par des matériaux composites collés extérieurement sur les structures dégradées. Les matériaux composites, en particulier à base de fibres de carbone, de par leur rigidité spécifique, présentent un grand intérêt pour la réparation. De plus, malgré leur prix élevé, ils présentent un avantage économique certain car ils peuvent être mis en œuvre directement sur les structures par simple collage. Ceci permet de réduire considérablement les coûts liés à la manipulation des matériaux ainsi que les problèmes liés aux interruptions de trafic.

Le présent travail vise à apporter une contribution à la compréhension et à la maîtrise du phénomène de transmission d'effort et de renforcement des pièces comprimées en béton renforcées par des TFC.

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique, il comporte une présentation générale sur le contexte de la pathologie des ouvrages du génie civil et de leur maintenance, ainsi les matériaux composites utilisés dans cette étude.

Le deuxième chapitre, présente une campagne d'essais sur des éprouvettes de dimensions (16x32)cm² dosées à 350kg adaptée à la presse d'essai disponible au laboratoire LGCH.

Dans un premier temps, des essais de compression sont réalisés sur des éprouvettes saines (sans dégradations) puis renforcées par matériaux composites (tissu fer carbone) pour étudier l'influence du renfort utilisé sur le comportement et l'endommagement d'éprouvettes renforcées.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats d'essais sur des corps d'épreuves pré chargées à deux seuils (30 et 60%). Ces éprouvettes prés chargés ont été divisées en deux séries : l'une sollicitée en compression avec renforcement d'une seule couche de TFC et l'autre renforcée par deux couches de ce dernier.

Le mémoire est clos par une synthèse sur les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I

Etude bibliographique

I-1.INTRODUCTION

Dès leurs premières applications, les techniques de réparation des structures en béton armé par matériaux composites ont montré d'excellentes performances [T]. Associés à une mise en œuvre aisée, ces procédés ont fourni une réponse opportune face à un marché public de la réhabilitation (mise en conformité vis-à-vis des normes sismique par exemple.) au contexte particulièrement favorable. Ainsi, le renforcement des pièces en béton armé par collage d'un renfort de matériaux composites est une technique déjà largement employée [D]. De nombreuses entreprises proposent d'ores et déjà différentes solutions de réparation à base de fibres de carbone, d'aramide ou de verre, conditionnées sous forme de tissus ou bien encore de lamelles préfabriquées.

La littérature est riche en publications scientifiques concernant le renforcement d'éléments élancés (éprouvettes cylindres, poteaux et colonnes) confinés par des systèmes à base de fibres à haute résistance et/ou haut module et sollicités en compression simple (i.e. centrée). Nous présentons dans ce chapitre une étude bibliographique sur le sujet de la réparation et du renforcement par composites de colonnes sollicitées en compression. L'étude montre qu'il n'existe pas de méthode de dimensionnement spécifique à la réparation par composites oeuvre de l'état limite de service.

Le modèle de comportement du béton armé continue à être appliqué : il conduit à une évaluation du comportement en service très approximative et pénalise l'utilisation de composites si leur rigidité n'est pas suffisamment élevée. Le point le plus important est l'effet d'une réparation par composite sur l'ouverture des fissures, qui n'est pratiquement pas traité dans la littérature.

L'opération Réparation et renforcement des structures de génie civil par l'emploi de matériaux composites avait pour objectif de permettre aux maîtres d'ouvrages et aux maîtres d'œuvre d'employer les techniques de réparation, basées sur l'emploi de matériaux composites à base de fibres de carbone, en toute connaissance de cause. Cette opération comprenait notamment une importante campagne expérimentale sur poteaux, les règles de l'art actuelles n'étant, compte tenu de l'expérience française, correctement établies que pour les poutres et dalles en flexion

I-2. -PATHOLOGIE DU BETON

L'étude du comportement pathologique des ouvrages en béton armé et en béton précontraint met en évidence des endommagements de matériaux et de structures dus à des erreurs de conception ou au vieillissement 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 de service de la structure ainsi que de l'environnement climatique. Les principales causes de vieillissement sont d'origine chimique, physique ou mécanique.

I.2.1. Principales causes de dégradation des bétons (tableau 1)

Tableau I.1 : Principales causes de dégradation des bétons

Dues aux matériaux	Dues à l'environnement
Composition du béton <ul style="list-style-type: none"> • rapport E/C élevé • qualité des matériaux 	Causes chimiques <ul style="list-style-type: none"> • chlorures • sulfates • acides • carbonatation
Mauvaise maniabilité à la mise en œuvre <ul style="list-style-type: none"> • mauvaise composition du béton • incompatibilité ciment-adjuvant • température 	Causes physiques <ul style="list-style-type: none"> • gel-dégel • retrait • hautes températures
Mauvaise cure	Causes mécaniques <ul style="list-style-type: none"> * abrasion, érosion, ...

I-2.2. Origine des dommages dans les structures en béton

Tableau I.2 : Origine des dommages dans les structures en béton

Origines	Description	%
Technologiques (composition du béton)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Béton de qualité inadéquate 2. Attaque chimique du béton 3. Corrosion des armatures (protection insuffisante) 4. Utilisation d'un composant inadéquat 	42
Constructives (mise en œuvre)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Négligence lors des contrôles sur chantier 2. Absence de contrôle ou ignorance des règles de l'art 	22
Conceptuelles	<ol style="list-style-type: none"> 1. calcul des efforts erroné 2. Estimation des déformations insuffisante 	12
Surcharges	Ouvrages calculés pour d'autres surcharges que celles qu'ils supportent	8
Fondations	Fondations inadéquates	7
Accidentelles	Incendie, explosion	4
Destruction	<ol style="list-style-type: none"> 1. Par addition d'au moins deux des causes précédentes 2. Par rupture d'une structure voisine 	5

I-2.3. Pathologies d'origine chimique

I.2.3.1 Carbonatation et corrosion des aciers

Il est important de retenir que le béton est un matériau basique et que, pour cette raison, il est vulnérable aux attaques acides et, plus particulièrement, à celles faisant intervenir des

acides forts. La carbonatation est une réaction chimique entre la chaux du béton et le dioxyde de carbone de l'air qui a pour effet d'abaisser le pH de la phase interstitielle du béton (figure.I.1).



FigI.1: Corrosion des armatures

Les conséquences de cette réaction chimique sont très dommageables pour les armatures qui se trouvent à un pH où elles ne sont plus passivées et peuvent alors se corroder[V]

1.2.3.2 Réactions sulfatiques

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

La chaîne de réactions chimiques aboutissant à la formation d'ettringite est bien connue, car on connaît les équations chimiques qui décrivent l'oxydation des sulfures de fer, l'hydrolyse des sulfates ferreux, ainsi que l'attaque des différents constituants de la pâte de ciment par les ions sulfates. Cette chaîne est présentée dans les travaux de [D2].

1-2.4. Pathologies d'origine physique

1-2.4.1 Retrait

Le retrait est un phénomène physico-chimique qui existe de façon systématique au sein du béton et qui se développe sous diverses formes depuis la prise du béton jusqu'à son vieillissement. Il correspond à l'action du départ de l'eau excédentaire du béton vers l'extérieur de l'élément de structure. Le symptôme caractéristique de l'action du retrait sur un ouvrage est la fissuration qui peut être soit orientée, soit multidirectionnelle. Les différents types de fissures de retrait peuvent être classés, suivant leur ordre chronologique d'apparition, en trois types [C1]:

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

Fissures apparaissant juste après le décoffrage : ces fissures affectent aussi bien les surfaces horizontales que les parements verticaux. Ces fissures sont généralement fines et peu profondes, mais elles peuvent être plus ouvertes lorsque le retrait thermique en est la cause.

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

I-2.4. 2Gel-dégel

L'eau infiltrée dans le béton augmente de 9 % en volume lors du gel. Cette augmentation de volume engendre des contraintes internes créant ainsi des fissurations [F1]. La succession des cycles d'humidification et de gel élargit peu à peu ces micro-fissures qui amèneront la destruction en surface du béton, sous la forme de plaquettes .

La dégradation par gel-dégel est amplifiée par des chocs thermiques. En effet, la chaleur de fusion de la glace est de 80 cal/kg. Cette chaleur est empruntée au voisinage immédiat du lieu où se trouve la glace, cette couche se trouve alors soumise à une chute brutale de température qui passe en dessous de 0°C, et l'on aboutit à des sollicitations dans le béton de type choc thermique. L'une des méthodes les plus employées pour pallier les problèmes de gel-dégel est l'emploi, au moment de la mise en œuvre, d'adjuvant tels que des entraîneurs d'air. La principale fonction de ces entraîneurs d'air est de créer des vides permettant de compenser le gonflement du béton.

I-2.5. Pathologies d'origine mécanique

I-2.5.1 Les chocs

Les désordres induits par l'exploitation d'un ouvrage constituent une cause non négligeable de dégradation du béton. Il s'agit le plus souvent d'action accidentelle de type mécanique qui se concrétise par des chocs .Les chocs les plus fréquents sont ceux des poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts, les chocs de bateaux ou d'objets flottants contre les piles en rivière. Ces chocs peuvent créer des épaufrures, des éclats important de béton, voir même des ruptures d'acier.(figure I.3)

I-2.5.2 Délamination

L'action conjuguée des sollicitations climatiques, des sels anti-verglas et du trafic circulant directement sur le béton des hourdis de ponts a provoqué des délaminations du béton sur un nombre considérable d'ouvrages d'art .Dans les cas les plus graves, cette pathologie aboutit à la chute de plaque de béton et à la création de trous dans les tabliers de ponts (figure I. 2). D'autres types de pathologie peuvent être rencontrés dans les ouvrages en béton tel que celles dues aux erreurs de conception ou encore les erreurs d'exécution qui peuvent intervenir dès la fabrication du béton et se poursuivre jusqu'à la mise en service finale de l'ouvrage.



Fig. I.2 : Délamination du béton d'un hourdis de pont aboutissant à la formation d'un trou



Fig. I.3 : Choc sur une pile de pont

I-3 REPARATION DES OUVRAGES EN BETON

I-3.1. Méthodes de réparation

Le choix de la méthode de réparation et des matériaux à mettre en œuvre est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, en tenant compte des critères économiques des matériaux de construction, des conditions de chantier et des contraintes de site. Le principe du renforcement ou de la réparation consiste en adjonction

de matière dans les zones où les sections sont trop sollicitées. Une section devient trop sollicitée si, du fait même des dispositions adoptées ou du changement des conditions d'exploitations, les efforts appliqués sont supérieurs à ceux pris en compte dans les calculs (problème du renforcement), ou bien si la résistance a diminué par suite de dégradation (problème de la réparation). Selon les cas étudiés, il est nécessaire de faire intervenir la notion de PROTECTION de l'ouvrage visant à assurer par exemple des fonctions d'étanchéité ou à limiter les phénomènes de corrosion, la notion de REPARATION visant à restituer les caractéristiques initiales de portance (rigidité – résistance) et éventuellement, la notion de RENFORCEMENT ayant pour objectif d'améliorer les performances de la structure vis-à-vis de conditions d'exploitations modifiées ou d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage. Différentes technologies de réparation et de maintenance des ouvrages sont couramment utilisées depuis de nombreuses années.

I-3.2 Réparation d'ouvrage par matériaux composites

I-3.2.1 Introduction

Les enjeux économiques ont été à l'origine de la prise de conscience de l'importance de la maintenance et, ainsi, au développement des techniques de réhabilitation.

Les techniques traditionnelles ont montré leurs limites au comportement à long terme (oxydation des tôles d'acier, durabilité du béton projeté, etc.).

En même temps, la rentabilité d'une opération de maintenance est conditionnée par sa durabilité, et donc, par la baisse des fréquences d'intervention. La recherche dans le domaine de réhabilitation s'est orientée vers l'utilisation de nouveaux matériaux capables de répondre aux différents critères exigés par les opérations de la maintenance des ouvrages. Plusieurs raisons ont permis aux matériaux composites, restés longtemps limités aux applications militaires et à l'industrie aéronautique, de s'implanter dans le domaine de génie civil. On peut citer parmi ces raisons le développement qu'a connu l'industrie des composites durant les trois dernières décennies et la crise qu'a traversé l'industrie aéronautique depuis le début des 90 ce qui avait comme conséquence une baisse des prix des composites. Aussi, le génie civil est un domaine qui nécessite trop de main d'œuvre, le coût de cette main d'œuvre dans les pays développés est devenue assez élevé de telle sorte que le prix de la matière première ne joue plus le rôle du "critère économique primordial". Ceci implique que le prix des composites ne peut plus être considéré comme un handicap,

surtout aux applications de réparation et de renforcement [H]. Depuis leurs premières applications en génie civil il y a maintenant 20 ans, l'intérêt des composites s'est généralisé sur l'ensemble de la communauté internationale, groupes industriels et laboratoires de recherche, et s'est particulièrement accentuée ces dernières années si l'on juge par l'importance du nombre de publications et colloques internationaux qui traitent quotidiennement de ce sujet.

Les matériaux composites utilisés en génie civil sont essentiellement des tissus en fibres de carbone, voir en fibre de verre pour certaine applications. Il reste évident que les résines adéquates doivent être utilisées pour optimiser l'emploi des fibres. Plusieurs procédés de renforcements sont apparus au cours de ces quinze dernières années. Les principaux utilisent directement les fibres sous formes de fil continu et d'autres font appel à des semi-produits plus ou moins sophistiqués, tels que les tissus secs, le tissu pré imprégnés ou des produits pultrudés.

1-3.2.2 Les matériaux

a-Introduction

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

Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et anisotropes.

Il faut différencier charges et renforts. Les charges, sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, modifient une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu...). Les renforts, sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés.

Description des constituants élémentaires des composites

Les matériaux composites unidirectionnels sont définis comme un arrangement parallèle de fibres noyées dans une matrice. Les principales phases élémentaires et les facteurs 'échelle

entre chaque élément sont illustré sur la figure I.4.

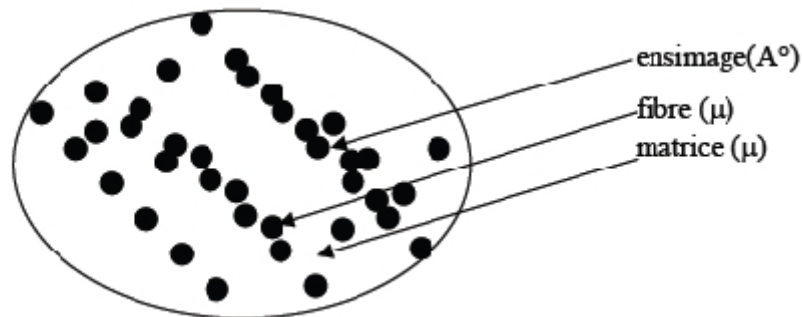


Fig.1.4 : Composants du composite

b-Les fibres

La fibre est constituée de plusieurs filaments élémentaires dont les diamètres varient entre 5 μm et 25 μm . Les lois de comportement des fibres sont de type "fragile". Il faut souligner le fait que les lois proposées correspondent à des essais sur mono-filaments et que le comportement mécanique d'une mèche de 10 à 15000 filaments peut différer de façon significative dans la mesure où la probabilité de rupture des fils élémentaires joue un rôle important.

Le tableau I.3 récapitule les principales propriétés des fibres.

Tableau I. 3 : propriétés des fibres

Filament	Diam. (μ)	Densité	Traction (MPa)	Module (MPa)	Allon. (%)	Fusion (°C)
Verre E	3-30	2.54	3400	73000	4.5	850
Verre D	3-30	2.14	2500	55000	4.5	-
Verre R	3-30	2.48	4400	86000	5.2	990
Carbone HR	8	1.78	3500	200000	1	2500
Carbone HM	8	1.8	2200	400000	0.5	2500
Aramide HR	12	1.45	3100	70000	4	480
Aramide HM	12	1.45	3100	130000	2	480

➤ Les fibres de carbone

Il existe deux types de fibres, celles à haute résistance (3 000 MPa) issues d'une mise en

Œuvre par carbonisation, celles à haut module (400 000 MPa) issues d'une fabrication par graphitisation. Les fibres de carbone sont fabriquées à partir du poly acrylonitrile. Les principales étapes de cette fabrication sont un étirage (orientation), une oxydation, une carbonisation et, pour obtenir une fibre à haut module, une graphitisation.

La fabrication des fibres de carbone fait appel à une technologie très délicate. En effet, les caractéristiques de la fibre obtenue en fin de processus dépendent, non seulement de la qualité de la fibre poly acrylonitrile de départ (ou précurseur), mais également du déroulement précis et rigoureux de chaque étape du procédé de fabrication dont le schéma est le suivant :

- fabrication de précurseur (PAN),
- étirage (orientation),
- oxydation (220°C) dans l'air sous tension,
- carbonisation 1500°C sous atmosphère inerte fibres de carbone haute résistance (HR),
- graphitisation 3000 °C sous atmosphère inerte fibres de carbone haut module (HM).

➤ **Le précurseur**

Le précurseur est adjuvanté d'un comonomère destiné à assouplir la fibre et permettre une filature aisée. La présence de comonomères permet également d'abaisser la température de l'étape d'oxydation ultérieure. La fabrication du précurseur est effectuée sur une ligne spéciale. La polymérisation est du type suspension, en continu ou en discontinu selon les technologies, puis le polymère est dissout dans un solvant (acides nitriques, sulfacyanures de sodium, chlorure de zinc). Le produit liquide obtenu est aspiré par des pompes doseuses qui le transfèrent dans une filière. En sortie de filière, le fil est traité par passage dans un bac contenant de l'eau additionnée de solvant et maintenue à une température précise. Les faisceaux de filaments sortant du bac sont saisis par des rouleaux qui leur font subir un étirage destiné à améliorer la cristallinité et l'orientation. Les fils sont ensuite lavés, puis séchés en étuve. Le précurseur, sous forme d'un faisceau de filaments unitaires est recueilli sur une bobine.

➤ *Stabilisation, oxydation de la fibre*

Des traitements complémentaires sont nécessaires pour stabiliser les chaînes moléculaires. La technique classique consiste à effectuer une oxydation partielle. Le fil est repris par un train de rouleau dans une étuve où il est chauffé à 200 °C puis il est étiré en présence d'air. L'étirage influence l'orientation du fil sous l'action de l'oxygène de l'air, par une réaction d'oxydation contrôlée, très délicate. La cyclisation des atomes de carbone et le pontage entre les chaînes se terminent.

➤ *La carbonisation*

A la sortie de l'étuve d'oxydation, le fil, toujours par l'intermédiaire de trains de rouleaux, passe, sous atmosphère d'azote, dans une série de fours à pyrolyse à température croissante de 600 à 700 °C jusqu'à 1300°C. Au début de la réaction a lieu une déshydrogénation due au départ de l'hydrogène. La phase de carbonisation se traduit par le départ des atomes d'hydrogène, d'azote et d'oxygène sous forme d'ammoniac, d'acide cyanhydrique et de divers composés du carbone que l'on brûle immédiatement à la sortie des fours. A la sortie du dernier four, le filament unitaire de carbone a un diamètre de l'ordre de 7 microns, soit environ la moitié de sa taille en sortie de filière.

Les caractéristiques des fibres ainsi obtenues sont :

- pureté : 97 à 98 % de carbone
- masse volumique : 1.8 g/cm³
- résistance traction : 3000 à 5000 MPa
- module en traction : environ 250 GPa

Ces fibres sont des fibres à haute résistance ou fibres HR.

➤ *La graphitisation*

Les fibres précédentes sont reprises, par l'intermédiaire d'un train de rouleau, dans un four de graphitisation à une température supérieure à 1800°C où elles subissent encore un étirage qui parfait le cycle. La structure moléculaire est alors proche du graphite Les caractéristiques des fibres obtenues sont :

- Pureté : 99 % de carbone,
- masse volumique : 2.10 à 2.20 g/cm³,
- Résistance traction : 2500 à 3000 MPa,
- module en traction : environ 500 GPa.

Ces fibres sont à haut module ou fibres HM.

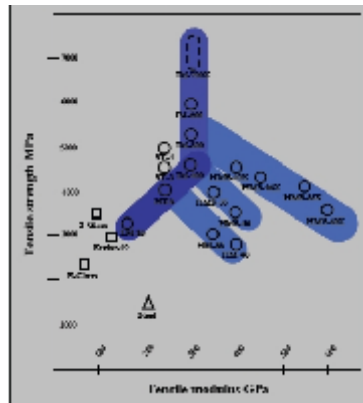


Fig. I.5: Résistance ultime pour différentes types de fibres de carbone

Les fibres de carbone ont une très bonne tenue thermique et un très faible coefficient de dilatation ($-0.7 \cdot 10^{-6} \text{ m/C}^\circ$). Les fibres sont inertes à température ambiante et vis-à-vis de la plupart des agents chimiques. Le graphe de la figure I.5. illustre les caractéristiques mécaniques de différents types de fibre de carbone. Les mèches de carbone sont caractérisées par leur nombre de filaments défini par une unité conventionnelle le k (1 millier de filaments correspond à un k).

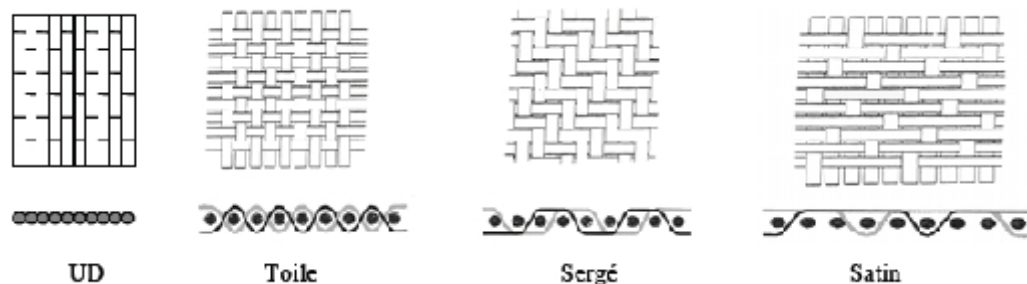
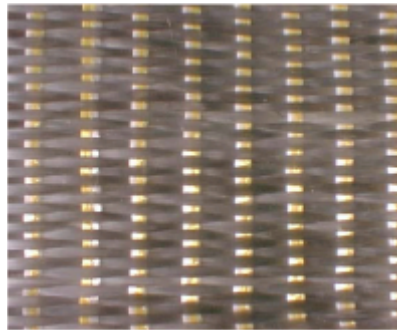


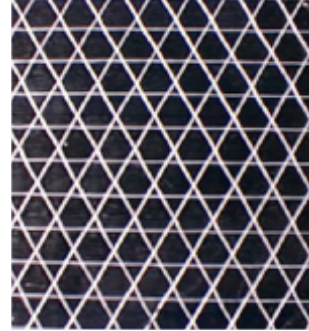
Fig. I.6: Armures classiques de tissus techniques

Les mèches les plus courantes sont les 3k, 6k, 12k et 24k. Des mèches avec plus de 70k commencent à voir le jour sur le marché. Les fils sont assemblés entre eux pour créer des mèches et une armure textile. Cette armure permet d'obtenir un matériau bi-directionnel ayant des fils dans deux directions perpendiculaires (direction principale : sens chaîne ; direction secondaire : sens trame) (figure I-6). Généralement, les armures textiles utilisées en renforcement sont des armures unidirectionnelles ; les fils en sens trame (fil de liage) sont uniquement destinés à faciliter le conditionnement et la mise en oeuvre en maintenant les fils longitudinaux en position. Ils créent toutefois des défauts géométriques en imposant

une ondulation des fils dans le sens trame. Ce phénomène peut être résolu par placage d'un filet sur les nappes UD pré imprégnés (figure I-7).



(a) tissus Ud avec fils de liage



(b) tissus UD avec un filet

Fig.I.7 :Photo de divers tissus Unidirectionnels

c-Les renforts

➤ **Fibre de verre** (figure .8) :

Elles constituent 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). On distingue trois types de fibres :

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

➤ **Fibre de carbone** (figure .9) :

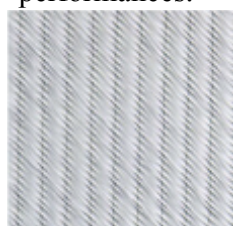
C'est la fibre la plus utilisées dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

- 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.

➤ **Fibre d'aramide** (figure .10) :

Souvent appelée KEVLAR®, 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 :

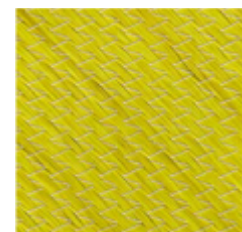
- les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;
- les fibres haut module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.



FigI.8: Fibre de verre



FigI.9: Fibre de carbone



FigI

➤ **Fibre de bore :**

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

➤ **Fibre de silice (ou de quartz) :**

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée.

➤ **Fibres de polyéthylène de haut module :**

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

d-Caractéristiques moyennes des fibres et renforts (tableau 4)

Tableau I.4 : Caractéristiques moyennes des fibres et renforts

Renforts	Diamètre du filament (µm)	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C ⁻¹
	d	Mv	E	G	k	C _t	A	α
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0,25	2 500	3,5	0,5*10 ⁻⁵
Verre R	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	0,3*10 ⁻⁵
Carbone HM	6,5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	0,08*10 ⁻⁵
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	0,02*10 ⁻⁵
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	-0,2*10 ⁻⁵
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0,8	0,4*10 ⁻⁵
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

➤ **Architecture des renforts :**

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

-Les unidirectionnels (UD) (figure I. 11):

Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand.

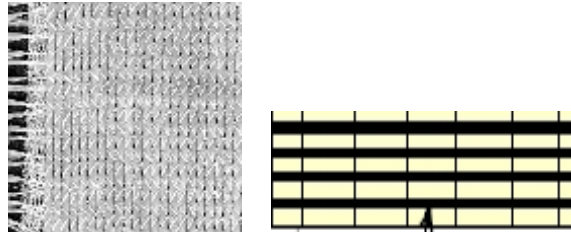


Fig. 1.11: Les unidirectionnels (UD)

Les tissus se composent de fils de chaîne et de trame perpendiculaires entres eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.

-Toile ou taffetas (figure 12):

Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement.

Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques.

-Serge (figure 13):

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

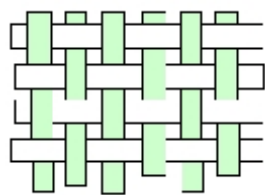


Fig.12: Toile ou taffetas

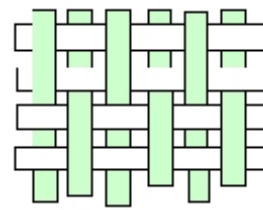


Fig.13: Serge

-Satin:

Chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs (n-1) fils de trame et réciproquement.

Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissus présente une forte masse spécifique (figure 14).

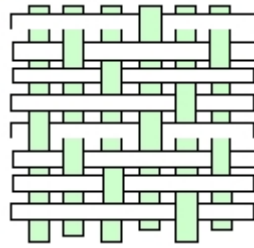
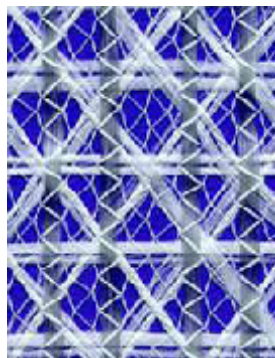


Fig.14: Satin

Comme un tissu est difficilement déformable sur une surface gauche, on réalise également pour des utilisations spécifiques des armures bi ou tridimensionnelles (figure 15).

Il est également possible de réaliser des structures de renforts hybrides en tissant des fibres de natures différentes ou, en superposant des tissus ou nappes de renforts de fibres différentes (figure 16).



Tissu multiaxial



Tissu 3D ou tresse



Fig. 16 : Tissu hybride carbone – aramide

Fig. 15 : Armures bi ou tridimensionnelles

e-Les résines époxydiques

Les époxy sont des résines thermodurcissables qui réticulent de façon irréversible. Elles polymérisent à l'aide d'un durcisseur et d'un accélérateur et ont une structure macromoléculaire tridimensionnelle. La polymérisation a lieu à température ambiante également.

Les polymères époxy ont de bonnes propriétés en traction, en flexion, en compression. Les propriétés mécaniques des résines époxydiques sont données dans le tableau I-5.

Tableau I. 5 : Propriétés mécaniques des résines époxydiques

Resistance a la traction (MPa) 50 a 80	50 a 80
Allongement a la rupture (%)	1 a 1,5
Resistance au choc (MPa)	7 a 10 KJ/m ²
Resistance a la compression(MPa)	140 a 150
Module de traction (GPa)	3 a 10

En plus des bonnes propriétés mécaniques (tableau 5), les résines polyesters ont une bonne stabilité dimensionnelle, une bonne mouillabilité des fibres, une bonne tenue chimique. Par contre, les principaux inconvénients de ces résines portent sur la sensibilité à la fissuration, la mauvaise tenue aux chocs, aux vapeurs d'eau et aux ultra-violets et ces résines présentent un fort pouvoir inflammable. L'ensemble de ces inconvénients pénalise ces résines vis-à-vis d'un emploi en génie civil, a moins d'utiliser un "gel-coat" de protection.

➤ Les charges et additifs

Différents produits peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières. Les quantités de produits peuvent varier de quelques dizaines de pourcentage dans le cas de charges à quelques pourcentages et moins dans le cas d'additifs. Les propriétés particulières qui peuvent généralement être améliorées portent sur les résistances mécaniques (compression) et les propriétés de mise en oeuvre (tixotropie). Nous pouvons ainsi citer en exemple les charges renforçantes qui se présentent sous formes sphériques (microbilles de verres) ou non sphériques (écailles de mica), les charges non renforçantes qui ont pour rôle de diminuer le coût de la résine et peuvent contribuer à l'augmentation de certaines propriétés (masse volumique, dureté, module d'élasticité).

Les additifs interviennent comme lubrifiants, colorants ou agents anti-ultraviolets. Il est important de noter que l'ensemble de ces ajouts modifient les propriétés physiques et mécaniques des résines.

I-4. Les différents procédés de mise en oeuvre

Toute mise en oeuvre de matériaux composites sur une structure endommagée nécessite d'abord un ragréage de la surface à réparer. Celle-ci doit être plane et propre. Dans la plupart des cas, une injection de fissure et un traitement de surface par sablage sont réalisés.

1.4.1 Mise en œuvre par enroulement filamentaire

La fibre est produite sous forme de fibres continues de très grande longueur. Elle est déposée et enroulée régulièrement autour d'un mandrin. La longueur de fibres continues peut varier de 600 m à 5 km (soit 0,8 g 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 (figure. I. 17). Le principal avantage de ce procédé est l'automatisation complète du système de pose, son principal inconvénient est le fait qu'une pose manuelle est nécessaire pour renforcer les extrémités des piles et des colonnes et que cette méthode demande en outre du temps et des manipulations importantes pour installer le matériel. Cette méthode a surtout été développée au Japon, et elle est aujourd'hui utilisée au Japon et en Amérique du Nord.



Fig. I.17: Renforcement par fibres sèches. Enroulement automatisé

1-4.2. Mise en œuvre par stratification directe de tissus secs

Les fibres de carbone permettent, comme beaucoup de fibres longues, de fabriquer des tissus de différentes formes et tailles. Ces tissus sont obtenus par assemblage des fils entre eux pour créer une armure. Cette armure permet d'obtenir un matériau unidirectionnel ou bidirectionnel selon l'orientation des fils.

Le renforcement de structures à partir d'un tissu sec 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 marouflage, 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. Le principal avantage du renforcement par tissus secs est la manipulation très facile sur chantier avec une absence totale de matériel lourd à déplacer. Cette technique permet notamment un suivi parfait de la forme du support ainsi que la maîtrise de l'épaisseur du film de résine.

En utilisant des polymères qui polymérisent à température ambiante, il est possible de réaliser une stratification directe, en respectant les étapes suivantes:

- préparation de la surface, application de la couche primaire,
- application d'une première couche de polymère époxyde,
- application d'une première couche de tissus secs,
- application d'une seconde couche de polymère époxyde,
- protection, finition.

Ce procédé présente l'avantage d'une mise en œuvre simplifiée, mais le renforcement acquiert toute sa résistance au bout d'une semaine et le contrôle de la qualité de l'application doit être soigné suivant les conditions de mise en œuvre. Ce procédé a trouvé de nombreuses applications en Europe, au Japon et aux Etats-Unis .

La température n'est pas contrôlée lors de l'application, cette méthode de mise en œuvre nécessite donc le contrôle des propriétés mécaniques des matériaux. Les principaux paramètres qui doivent être suivis sont les températures et l'humidité du support. L'ensemble de ces paramètres contribue à la modification des propriétés mécaniques du composite en place.

I-4.3Le collage de plaques composites

Les plaques composites sont obtenues à partir 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 pré imprégnées 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 x 1 mm,

leur longueur, suivant la demande, varient de quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres.

À partir de ces bandes pultrudées, la technique de renforcement est similaire à celle du plat collé métallique selon le procédé L'Hermitte. Elle a démarré conjointement au Japon et en Europe, plus exactement en Suisse à la fin des années 1980. Après quelques chantiers d'essais, cette technique fut employée par la société Sika en Suisse dès 1993, puis étendue en Allemagne dès 1995 et en Angleterre en 1996. L'avantage de cette méthode est la facile extrapolation des résultats obtenus par le collage de tôles d'acier à ceux obtenus avec des produits pultrudés également collés, la technique du renforcement restant la même. Comparée avec 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 limitée. Le procédé de collage est le suivant (figure .I.18) :

- nettoyage à l'acétone de la face de collage de la plaque,
- traitement de surface à réparer par sablage,
- traitement par eau sous pression et meulage,
- nettoyage de la surface par un dépoussiérage,
- le polymère époxy est appliqué sur la plaque de composite,
- la plaque est ensuite pressée sur la surface, l'excédent de colle est enlevé,
- une pression à l'aide d'un sac à vide est appliquée jusqu'à complète polymérisation du polymère.

Ce procédé a trouvé de très nombreuses applications en Suisse [M1] par exemple avec le pont de l'Ibach à Lucerne, le pont autoroutier de l'autoroute Bsel-Gotthard et un parking à Flims Graubünden.

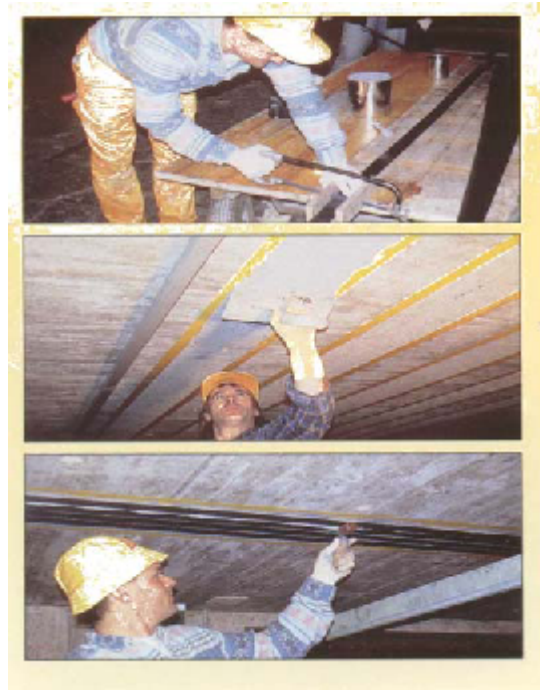


Fig. I.18 : Procédé par collage de plaques (Sika, 1996)

I-5.Problèmes liés à l'utilisation des composites

I-5.1Introduction

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

I-5.2Problèmes liés à l'interface béton composite

Plusieurs travaux expérimentaux ont été réalisés sur le renforcement des poutres par composites et le mode de rupture prédominant est souvent le décollement du renfort [F1]. Ce mode de rupture, connue par le peeling-off (figure I.19), a suscité beaucoup d'intérêt

chez les chercheurs puisqu'il permet d'évaluer la capacité de transfert des charges entre le support en béton et le renfort composite.



Fig.I. 19 : décollement du renfort - le peeling-off-

I-5.3 Durabilité des structures renforcées

La durée de vie d'une structure en béton est de l'ordre de 50 à 100 ans, et le renfort doit être aussi durable pour permettre à la structure renforcée de résister pour une période de temps du même ordre. Le renforcement par matériaux composites date des années 80 et les observations in-situ ne permettent pas, pour le moment, de juger la durabilité des structures renforcées par composites. On recense dans la littérature un grand nombre de travaux traitant de la durabilité des renforts. Dans un premier temps, on trouve des études des effets de l'environnement sur les renforts composites. Dans les régions présentant des basses températures hivernales se pose le problème du comportement de la structures renforcée par composites vis-à-vis des cycles gel dégel. Une campagne d'essai est réalisée à l'université de Sherbrooke sur des poutres renforcées par matériaux composites et soumises à 300 cycles de gel-dégel (-18°C à 15°C). L'ensemble des résultats montre que l'interface béton-composite n'est pas affectée par les cycles gel-dégel [G]. D'autre part, et pour étudier l'effet de l'environnement sur les renforts carbone époxy, un programme expérimental a été lancé au Canada depuis 1997 Pour étudier le comportement à long terme des stratifiés carbone époxy sous différentes configurations. Les spécimens sont exposés sur des sites présentant différents conditions climatiques (température et pluie) et l'évolution des propriétés mécaniques (résistance entrainement et en cisaillement) est suivie sur une période de 1 à 10 ans. Les résultats montrent une chute de la résistance en

cisaillement plus évidente que celle en traction durant les trois premières années, cette même étude a montré aussi que l'ajout des couches de protection n'empêche pas la chute des caractéristiques mécaniques [L3].

Au Japon, où les composites sont utilisés en remplacement des barres d'acier, une étude a permis la classification des composites en fonction de la durabilité des fibres [U].

L'auteur conclut que les fibres du carbone présentent le meilleur comportement à long terme, en revanche, l'utilisation des fibres de verre doit prendre en compte leur faible résistance en fatigue, à l'alcali-réaction et aux rayons ultr-violets.

Concernant le comportement en fatigue, les composites carbone/époxy présentent la meilleure résistance parmi tous les matériaux utilisés dans le renforcement des ouvrages.

Plusieurs auteurs ont étudié le phénomène de fatigue dans le cas des poutres renforcées.

Ferrier met l'accent sur le fait que les lois de comportement en fatigue sont directement dépendantes de la nature des propriétés des durcisseurs, température de transition vitreuse et des conditions de transformation des polymères. Pour caractériser le joint de colle en fatigue, l'essai de traction cisaillement a été utilisé en alternant des cycles de charges-décharges d'une fréquence de un hertz (figure 20) [T1]

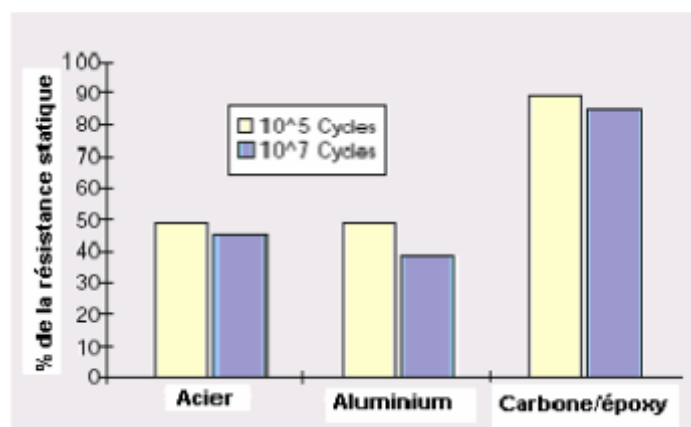


Fig.I.20: le comportement en fatigue

I-6. Application des composites dans la construction en génie civil

I-6.1. Utilisation des barres de FRP la fabrication des poutres en béton armé

La fabrication de barres en matériaux composites comme remplacement des barres d'armatures conventionnelles en acier a commencé au milieu des années 80. Les fibres de carbone et d'aramides ont spécialement été utilisées au Japon, tandis qu'en Europe ce sont des fibres de verre et d'aramide qui ont été fabriquées. Aux États-Unis, ce sont les barres d'aramide qui étaient le plus couramment utilisés. Les barres peuvent être utilisés au niveau des dalles de plancher, des tabliers de pont, des poutres en béton précontraint, dans les murs de soutènement ainsi que dans les ancrages utilisés en géotechnique.

La durabilité de ces matériaux face à la corrosion leur permet d'être utilisés dans des applications très variées. La corrosion des barres engendrée par l'infiltration d'eau dans les fissures provoque une perte de résistance qui peut s'avérer très importante dans certains cas. Les viaducs d'autoroutes sont très touchés par ce problème. Les sels de déglçage qui sont fréquemment utilisés et les cycles de gel-dégel répétitifs représentent les causes principales de la dégradation actuelle des structures en béton armé, précontraintes ou non. À Sherbrooke au Canada, le pont Joffre a récemment été reconstruit et une section de la dalle contient des matériaux composites [L2]. En effet, un grillage fabriqué avec de la fibre de carbone a servi à remplacer l'acier que l'on retrouve dans la partie supérieure de la dalle. En plaçant des composites dans la zone le plus en contact avec les sels de déglçage, on parvient à diminuer le taux de dégradation de cette section.

Les niveaux de résistance en traction des barres de composite sont très élevés et dépassent de beaucoup ceux de l'acier conventionnel (aramide: 2400-3100 MPa, carbone: 2400-5700 MPa, verre: 3300-4500 MPa). Dans le cas de l'acier, la résistance peut atteindre 1860 MPa.

I-6.2 Utilisation de barre de FRP pour des ancrages souterrains

De nombreux ouvrages géotechniques ont besoin d'un système d'ancrage souterrain pour soutenir une structure, comme pour les murs de soutènement ou bien pour d'autres ouvrages de stabilisation des sols. Le principe derrière l'utilisation de ces ancrages est de retenir la structure en créant une contrainte entre l'extrémité de l'ancrage et le sol. On utilise

des barres de précontrainte en acier comme dans les poutres, mais le même problème de corrosion persiste. L'utilisation de câbles en FRP a su démontrer les performances de ce matériau dans un milieu corrosif.

I-6.3 Réhabilitation des structures à l'aide de FRP

Après l'indépendance de l'Algérie, un nombre impressionnant de structures ont été édifiées. Toutefois, plusieurs d'entre elles approchent la fin de leur durée de vie utile. Ceci touche autant les bâtiments que les ponts en béton armé. La dégradation de ces ouvrages est accélérée par les agressions chimiques, les chocs mécaniques et l'augmentation soutenue des charges d'utilisation. Il faudrait donc pour plusieurs de ces ponts envisager une reconstruction. Mais les restrictions budgétaires imposées par notre gouvernement nous incitent à trouver des solutions plus économiques et plus durables. Les matériaux composites peuvent offrir une méthode efficace malgré le nombre limité d'exemples pratiques.

Les ingénieurs en structures ont d'abord utilisé des plaques d'acier pour le renforcement des structures. L'idée principale qui a guidé le dimensionnement des structures renforcées a été émise par L'HERMITE. C'est en 1964, en Afrique du Sud, que remonte le premier cas d'utilisation des plaques d'acier ancrées sur la surface tendue pour augmenter la résistance en flexion des poutres en béton armé d'un pont.

Les premières utilisations des FRP ont été effectuées principalement dans le domaine de l'aérospatiale, du génie mécanique, des transports publics et dans la fabrication des articles de sport de haut niveau. C'est à la fin des années 60 que des recherches ont commencé pour l'utilisation de barre en FRP à base de fibre de verre comme substitut aux armatures d'acier à Rutgers University au New Jersey [A2].

Les plaques de FRP à base de carbone ou de verre, ont été utilisées au départ comme protection contre la corrosion. Elles ont l'avantage d'éliminer le problème de limitation des longueurs, puisqu'elles peuvent à priori n'importe quelle dimension. De plus, elles se sont avérées très efficaces pour augmenter la résistance en flexion et en cisaillement, quand elles sont collées en forme de plaques sur les faces extérieures des éléments en béton armé.

Ainsi, plusieurs renforcements ont été effectués sur les poutres, murs, dalles et sur des colonnes en béton armé (voir figure I.21).

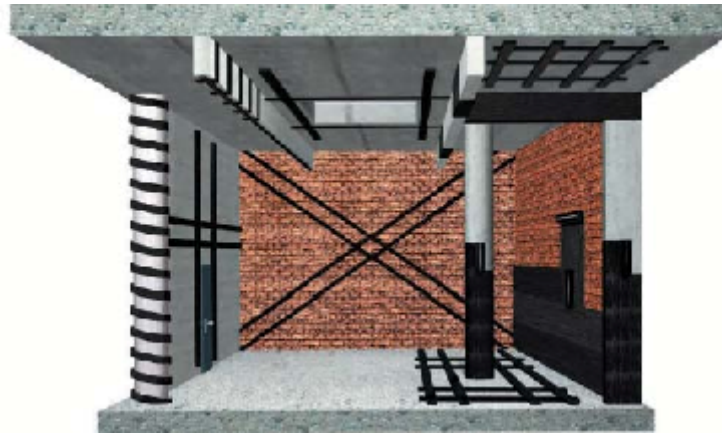


Fig. 1.21. Eléments de structure pouvant être renforcé par matériaux composites [NET 01]

La première utilisation importante de matériaux composites s'est faite en Suisse en 1991, pour la réhabilitation du pont Kattenbusch, en Allemagne. Ce pont est constitué de poutres caissons continues sur 11 travées. L'effet des gradients de température a amené une fissuration prématurée au niveau de certains joints. Un renforcement avec des plaques de fibre de verre a été utilisé (voir figure 1.22).

L'utilisation des matériaux composites pour la réhabilitation et le renforcement devient une solution préconisant un remplacement tout aussi efficace que l'acier. A titre comparatif, le tableau 1.6 donne les avantages des composites sur l'acier.

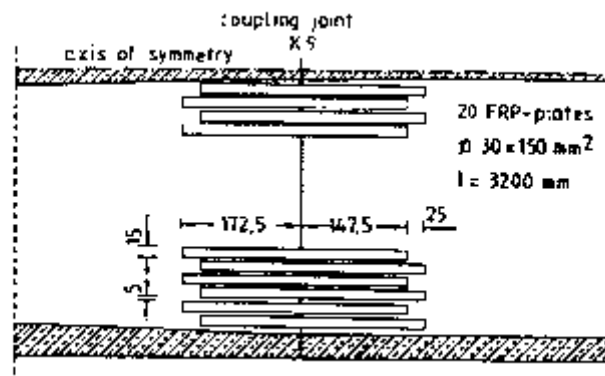
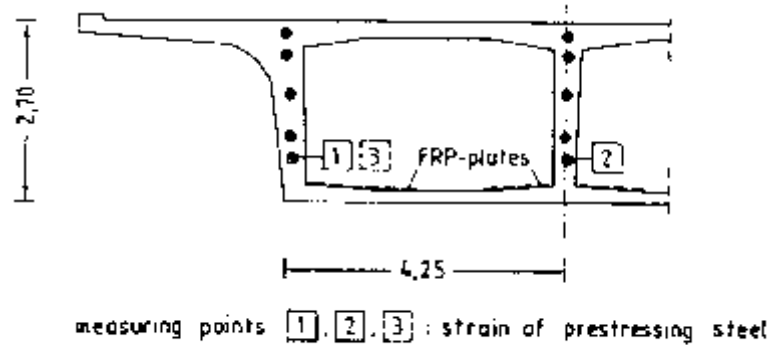


Fig. I.22. Réhabilitation du pont Kattenbusch en Allemagne [L2]

Tab. I.6. Comparaison entre les plaques d'acier et celles de composites [L2]

Critères	Avec les composites	Avec aciers
Poids propre	bas	élevé
Résistance en traction	très élevée	élevée
Épaisseur	très basse	basse
Corrosion	aucune	oui
Longueur des plaques	illimitée	limitée
Manutention	facile, flexible	difficile, rigide
Capacité de chargement	direction longitudinale	toutes directions
Chevauchement (Joints)	facile	complexe
Comportement en fatigue	remarquable	adéquat
Coût du matériel	élevé	bas
Coût des installations	bas	élevé
Application	pas d'équipement	appareils de levage et d'attache

I-6.4 Réhabilitation des colonnes

Les colonnes qui forment les structures ouvertes (ponts, parkings) sont très affectées par les conditions environnementales. Le béton de recouvrement est souvent fissuré par les cycles de gel-dégel, sans compter la participation des agents de déglacage qui ont pour effet d'accélérer le processus. Les étriers et les barres longitudinales ne sont pas épargnés et la corrosion amène des pertes de résistance de cet acier. Différentes méthodes de réhabilitation existent présentement pour réparer les fissures dans les colonnes. Le plus fréquemment, on enlève la couche de béton fissurée puis on la remplace par un mortier et la réparation s'arrête là, Mais ces techniques ne permettent pas d'éliminer le processus d'infiltration d'eau par les parois pour protéger les armatures.

La technique de renforcement, propre aux colonnes en béton armé, consiste à envelopper ces colonnes de feuilles de FRP. Les fibres sont placées dans la direction circonférentielle (voir figure 1.23). Cette enveloppe crée un effet de confinement du béton qui augmente la résistance de la colonne aussi bien à la compression qu'au cisaillement. En plus de redonner à la structure, une capacité supplémentaire, le pilier est maintenant protégé contre la corrosion accélérée dans la zone de marnage. Cette méthode peut aussi servir à augmenter la résistance de certaines structures situées dans des zones sismiques très actives. Les bâtiments qui ne respectent plus les codes de construction en vigueur peuvent retrouver une résistance et une ductilité améliorées par l'emploi des feuilles de composites.



Fig. 1.23. Confinement de colonnes de ponts par matériaux composites [K]

1-6.5. Réhabilitation 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 [L2]. 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



Fig. 1.24. Réhabilitation d'un mur en maçonnerie (Suisse) [NET 01]

1-6.6 Réhabilitation des dalles

L'utilisation de composites en bandes peut aussi améliorer la résistance en flexion de dalles en béton armé. Leur légèreté et flexibilité s'avèrent efficace, la réparation ou le renforcement peuvent se réaliser dans un délai de temps très court, avec très peu d'embarras et un espace de travail limité.



Fig. 1.25 Renforcement d'une dalle de pont [K]

En Algérie, on recense un seul cas de renforcement de dalle, fait à l'usine LPA de Boudouaou près de Boumerdes en 2001.

I-6.7.Réhabilitation des poutres

Le renforcement des poutres par matériaux composites a connu une percée au cours de la dernière décennie, en réponse aux problèmes rencontrés avec l'usage de plaque d'acier. On peut effectuer avec les FRP un renforcement en flexion en collant les bandes sur la surface inférieure de la poutre. Un renforcement en cisaillement peut être apporté par le collage des bandes sur les joues de ces mêmes poutres. En Algérie, le premier cas d'utilisation de ces produits a été le renforcement des consoles en béton armé du stade de la ville de Tlemcen 1999 [SIK 03]. Depuis cette réparation, de nombreux autres cas d'utilisation de composite sont répertoriés (pont d'Hydra, pont de Oued Larbaâ, Pont Blanc d'El Harrach, etc.). Le cas du pont Blanc, situé à El Harrach, Alger, présente un des premiers exemples concrets de l'utilisation à grande échelle des composites pour le renforcement des ponts en Algérie (voir figure I.26).



a



b



Fig. 1.26. Réhabilitation du pont d'el Harrach, Alger

Photo CTC\Est)

a) Renforcement en flexion

b) Renforcement en cisaillement

I-7.CONCLUSION

On admet généralement que la durée d'exploitation d'un ouvrage en béton armé est de cinquante à cent ans, suivant son importance ou sa fonction. Durant cette période, il est possible que les ouvrages subissent des dommages importants à causes de plusieurs paramètres (changement d'exploitation de l'ouvrage, dégradation des matériaux, attaques par des agents corrosifs, etc..). L'utilisation des matériaux composites constitue une avancée considérable dans la réparation des ouvrages dégradés. Les avantages indéniables de cette solution (caractéristiques mécaniques, poids, durabilité, etc..) justifient pleinement leur utilisation pour la réhabilitation et la prolongation des durées de vies des ouvrages de génie civil.

I-8 Position du problème

L'utilisation des matériaux composites en génie civil vise l'un des deux objectifs suivants :

- 1 : le renforcement : la structure supportera des niveaux d'effort plus grand
- 2 : la réparation : permettre à la structure de retrouver sa capacité portante ou ses propriétés mécaniques initiales

Cependant, la réparation par les matériaux composites exige que les bureaux d'études disposent de nouveaux outils de conception et d'évaluation de la performance et de la durabilité des structures. Cette problématique, dépasse largement le cadre du génie civil. Elle concerne également la mécanique expérimentale des structures puisqu'il s'agit tout d'abord de comprendre le comportement mécanique complexe d'une structure en béton armé réparée par un matériau composite.

Il existe de nombreuses études dans la littérature dans le but de comprendre le comportement des structures en béton armé renforcées par des matériaux composites et vu la complexité et la spécificité particulière de chaque structure de nombreux aspects restent encore mal compris.

Dans ce travail est présenté une étude théorique et expérimentale menée d'une part sur une première série d'éprouvettes en béton renforcé par des matériaux composites à base de tissu en fibres de carbone et une résine époxydique et sollicitée en compression uni axiale. Le but de cette première série est de montrer l'influence du TFC sur le comportement et l'endommagement des éprouvettes D'autre part, une deuxième série d'éprouvettes en béton pré chargées préalablement à différents seuils puis renforcées par confinement en matériaux composites

I-8-1 Etude expérimentale

L'étude expérimentale entreprise a portée sur les points suivants :

- ✓ *comportement des éprouvettes en béton sous chargement en compression uni axiale*
- ✓ *comportement des éprouvettes en béton renforcé par recouvrement en matériaux composite en utilisant différentes couches .*
- ✓ *détermination des mécanismes d'endommagement des éprouvettes en bétons renforcées et non renforcées ;*
- ✓ *comportement de l'éprouvettes pré chargées à 30 et 60% et leurs charges ultimes;*
- ✓ *comportement des éprouvettes pré chargées à 30 et 60% puis renforcées par recouvrement en matériaux composite ;*
- ✓ *endommagement des éprouvettes pré chargées à de différents niveaux de chargement.*
- ✓ *comparaison entre les éprouvettes pré chargées à différent niveau de chargement.*

Created with

 **nitro**^{PDF} professional

download the free trial online at nitropdf.com/professional

CHAPITRE II

Influence du renforcement sur le comportement en compression des pièces en béton

II-1.ESSAI DE COMPRESSION DU BÉTON

II-1.1.Introduction

Les préoccupations de la sécurité des ouvrages réalisées en béton ont placé l'étude de la vérification des caractéristiques de ce produit au coeur d'une série de normes. La principale caractéristique du béton vis à vis de ce souci de sécurité est sa capacité de résistance à un effort de compression, cette caractéristique est en fonction de nombreux facteurs dont la composition des ingrédients entrant dans sa fabrication. Aussi afin d'étudier et de qualifier le produit, des éprouvettes de béton sont essayées en compression sur des machines spécifiques. Pour garantir la qualité de ces essais, ces machines de compression font elles-mêmes l'objet de prescriptions précises et normalisées. La vérification des caractéristiques des machines d'essai, pour la mesure de la résistance à la compression du béton s'effectue actuellement selon plusieurs normes. Ces dernières précisent notamment les modalités de vérification de l'exactitude du système d'induction de force de la machine. Des catégories de machines d'essais sont actuellement reconnues, elles correspondent à des précisions d'échelle. La répartition homogène de la force sur une section de l'éprouvette est au moins aussi importante par rapport à l'effet sur la résistance mesurée à la compression, aussi la norme présente des exigences concernant la manière du transfert de force. Dans notre étude on se base sur la

méthode de renforcement des colonnes du béton par recouvrement des matériaux composites à fibres de verre pour augmenter la charge maximale de rupture en compression.

II 1.2. Propriétés du béton

Le matériau béton est constitué par le mélange, dans des proportions étudiées, de ciment, de granulats et d'eau et d'adjuvants. La variation des différentes proportions de ces constituants se répercutera sur les caractéristiques physiques et mécaniques.

Une augmentation de la quantité d'eau entraîne une augmentation du fluage, du retrait et des tensions internes ; Elle équivaut à consommer inutilement du ciment.

Une diminution de l'eau donne des bétons raides, difficilement maniables. Le choix des granulats a une influence sur la fluidité du mélange. Les additions (fumée de silice, cendres volantes...) influent sur la compacité du béton, et complétant la courbe granulométrique du béton vers les éléments fins. Les adjuvants améliorent la maniabilité, modifie sa prise et son durcissement et, dans un certain cas, avoir un rôle d'entraîneur d'air, d'hydrofuges de masse.

II 1.3. Béton en compression

Les bétons durcis ont des lois de comportement non linéaires. Les paramètres qui régissent ces lois sont déterminés à partir d'essais de compression. Le paramètre le plus déterminants est la résistance en compression F_{ck} , qui est mesurée (à 7 et 28 jours) par écrasement d'éprouvettes cylindriques de 320 mm de haut et de 160 mm de diamètre conservés dans l'eau à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ [R]. La résistance à la compression varie de 20 à 40 MPa pour les bétons courants, et entre 50 et 100 MPa pour les bétons à haute performance.

Le diagramme contraintes-déformations du béton soumis à une compression uni-axiale passe par un maximum et décroît ensuite faiblement jusqu'à la rupture (voir figure. II.1). Le comportement en compression pour le béton typique est représenté par les courbes contraintes-déformations données dans la figure II.1. On remarquera la non-linéarité du matériau.

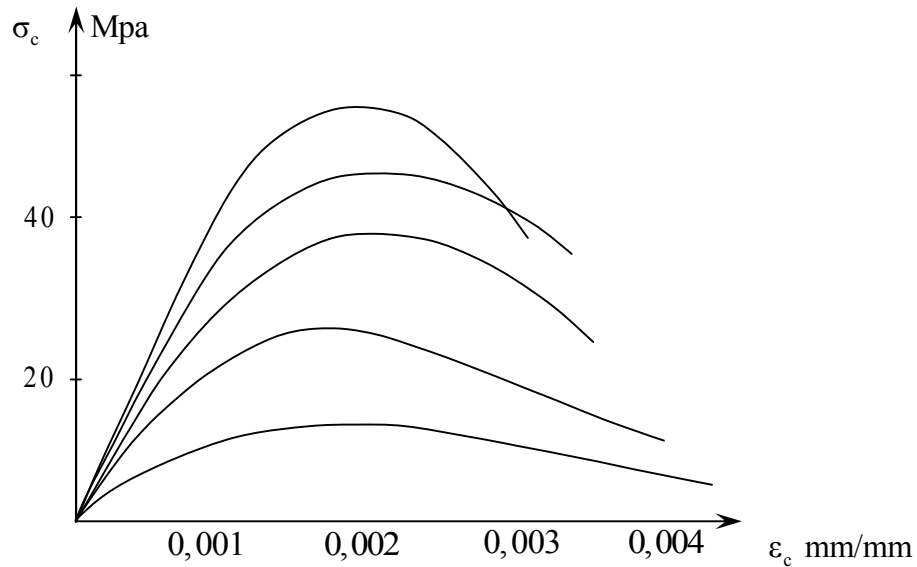


Fig. II.1. Courbes typiques contraintes-déformations

D'après ces courbes, on remarque que pour du béton plus résistant, la déformation ultime est plus faible. L'Eurocode 2 utilise la loi de Sargin [E3] pour la première partie du diagramme contrainte-déformation (voir figure II.2) dont l'équation est la suivante :

$$[2.1] \quad \sigma_c = f_{cm} \cdot \frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k - 2) \cdot \eta} \text{ pour } \varepsilon_c \in [0, \varepsilon_{c1}] \text{ avec}$$

avec

$$[2.2] \quad \eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \text{ et}$$

$$[2.3] \quad k = \frac{(1,1 \cdot E_{cm}) \cdot |\varepsilon_{c1}|}{f_{cm}}$$

f_{cm} désigne la valeur moyenne de la résistance à la compression. Elle se déduit de l'équation suivante :

$$[2.4] \quad f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)}$$

f_{ck} désigne la résistance à la compression caractéristique sur cylindre du béton.

ε_{c1} déformation sous contrainte de compression maximale f_m . Pour les bétons généralement utilisés, la valeur de ε_{c1} situe dans l'intervalle de 0,002÷0,0025. La valeur de ε_{c1} peut être calculée à partir de l'équation suivante :

$$[2.5] \quad \varepsilon_{c1} = -0,7 f_{cm}^{0,31}$$

E_{cm} désigne le module longitudinal de déformation. Il correspond à la droite reliant les points $f_c = 0$ et $f_c = 0,4.f_{ck}$. En l'absence de résultats expérimentaux, l'équation suivante permet de définir ce module est donnée en fonction de f_{cm} en MPa par :

$$[2.6] \quad E_{cm} = 22 \left[\frac{(f_{cm})}{10} \right]^{0,3} \text{ (MPa)}$$

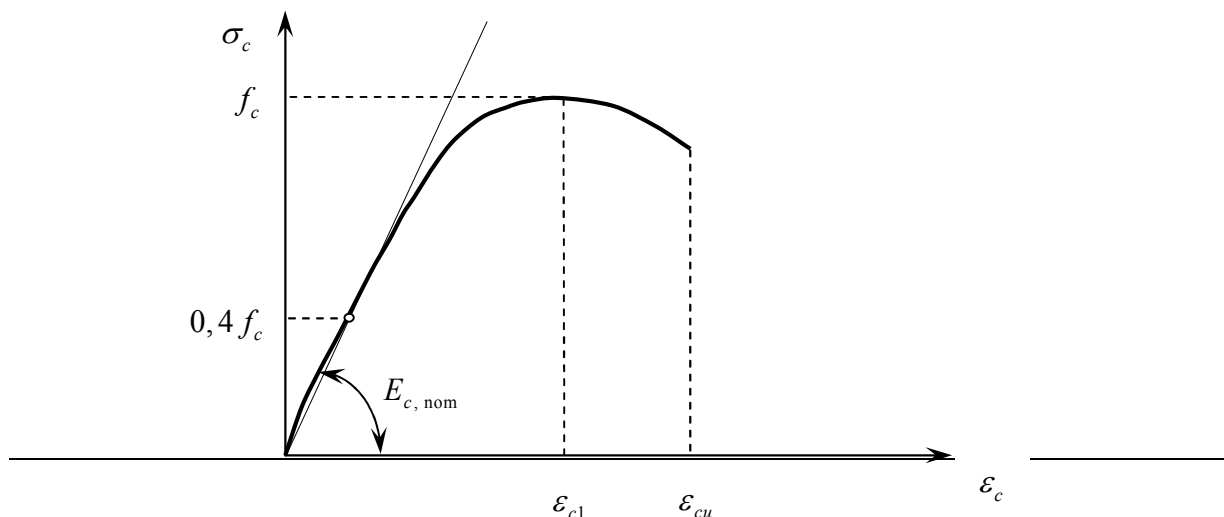


Fig. II.2. Diagramme contraintes-déformations du béton

Le comportement du béton peut être par une loi de comportement en forme de parabole-rectangle. Le diagramme parabole-rectangle est constitué d'un arc de parabole depuis l'origine des coordonnées jusqu'à son sommet de coordonnées ϵ_{c2} (voir figure II.3), prolongé par un palier d'ordonnée :

$$[2.7] \quad f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

avec

γ_c : coefficient de sécurité qui tient compte d'éventuels défauts localisés, ainsi que la réduction possible de la résistance du matériau mis en œuvre par rapport à sa résistance caractéristique définie a priori.

α_{cc} : coefficient qui prend compte les effets à long terme de la force de compression et d'effets défavorables qui résultent du chemin de la charge appliquée. La valeur recommandée est $\alpha_{cc} = 1,0$.

Les valeurs de ϵ_{c2} et ϵ_{cu2} sont données en fonction de f_{ck} dans le tableau II.1.

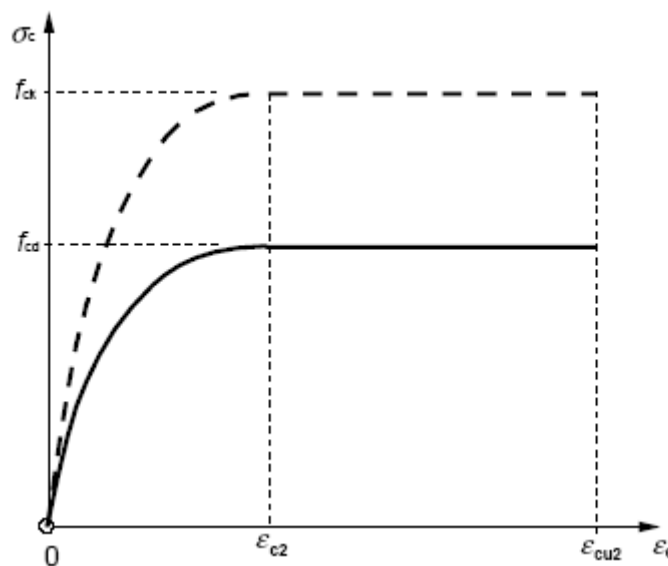


Fig.II.3. Diagramme parabole-rectangle des contraintes-déformations d'un béton comprimé

Le diagramme parabole-rectangle est défini par l'équation suivante :

$$[2.8] \quad \sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \text{ pour } 0 \leq |\varepsilon_c| \leq |\varepsilon_{c2}|$$

$$[2.9] \quad \sigma_c = f_{cd} \text{ pour } |\varepsilon_{c2}| \leq |\varepsilon_c| \leq |\varepsilon_{cu2}|$$

On peut aussi utiliser un diagramme bilinéaire (voir figure II.4) à condition qu'il soit équivalent au diagramme parabole-rectangle. Les valeurs de ε_{c3} et ε_{cu3} sont données dans le tableau II.1.

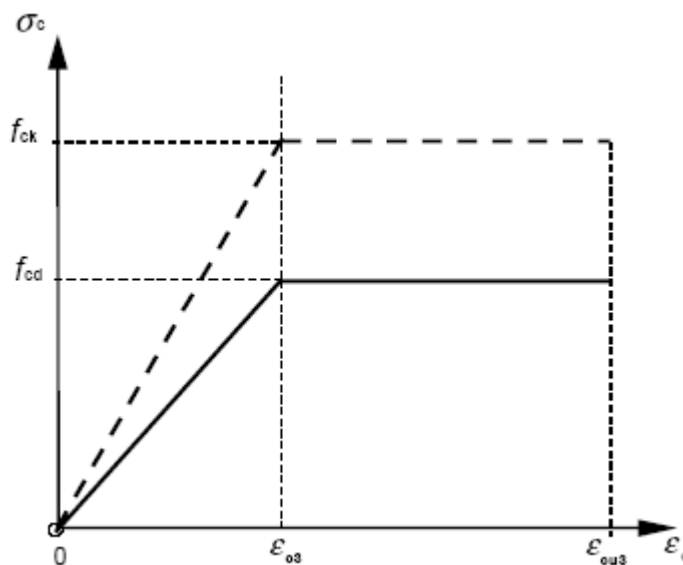


Fig. II.4. Diagramme bilinéaire des contraintes-déformations du béton

D'autres courbes théoriques existent, mais s'apparentent sensiblement à celle parabolique. on peut citer la courbe d'Hognestad décrite dans Park et Pauley [P]. Il s'agit d'une courbe parabolique avec une loi de comportement linéaire dans l'intervalle $[\varepsilon_{c1}, \varepsilon_{cu}]$ (voir figure II.5).

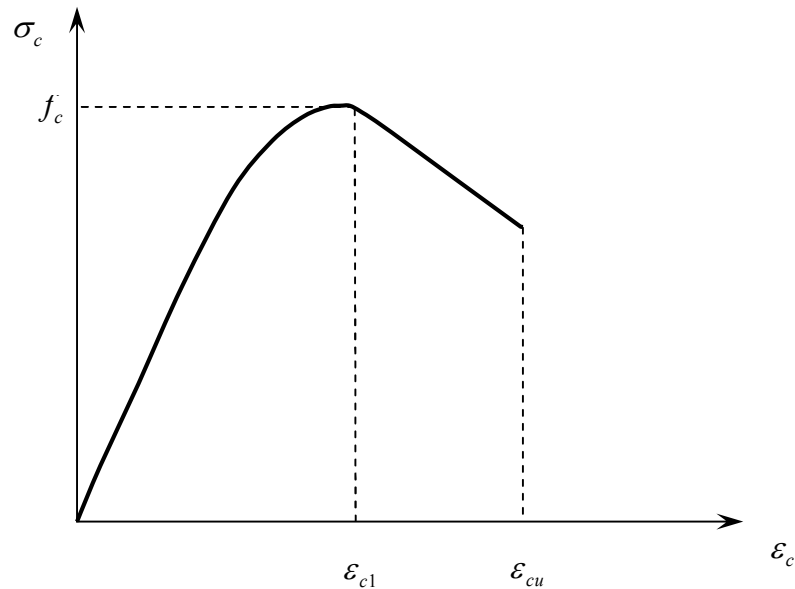


Fig. II.5. Diagramme contraintes-déformations d'Hognestad

La courbe est définie par les équations suivantes :

$$[2.10] \quad \sigma_c = f_{cd} \cdot \left[\frac{2 \cdot \varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \frac{\varepsilon_c^2}{\varepsilon_{c1}^2} \right] \text{ pour } \varepsilon_c \in [0, \varepsilon_{c1}]$$

$$[2.11] \quad \sigma_c = f_{cd} \cdot [1 - 300 \cdot (\varepsilon_c - \varepsilon_{c1})] \text{ pour } \varepsilon_c \in [\varepsilon_{c1}, \varepsilon_{cu}]$$

Cette courbe présente l'avantage d'avoir une formulation pour la partie ascendante et une autre pour la partie descendante, ainsi qu'une seule variable de définition.

Classe de résistance du béton													Relation Analytique			
1	f_{sk} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
2	$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
3	f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
4	f_{cm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{cm} = 0,30 \times f_{ck}^{(2/3)}$ SC50/60 $f_{cm} = 2,12 \times f_{ck}^{(1/3)}$ (1+ $(f_{ck}/10)$) > C50/60
5	$f_{ak,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ak,0,05} = 0,7 \times f_{cm}$ 5% Facile
6	$f_{ak,0,05}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ak,0,05} = 1,3 \times f_{cm}$ 95% Facile
7	E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	32	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22(f_{cm}/10)^{1,5}$ (f_{cm} in MPa)
8	ϵ_{c1} (‰)	-1,8	-1,9	-2,0	-2,1	-2,2	-2,25	-2,3	-2,4	-2,45	-2,5	-2,6	-2,7	-2,8	-2,8	Figure 3.2 $\epsilon_{c1}(‰) = -0,7 \times f_{cm}$
9	ϵ_{cur} (‰)					-3,5					-3,2	-3,0	-2,8	-2,8	-2,8	Figure 3.2 for $f_{cm} \geq 60$ Mpa $\epsilon_{cur}(‰) = -2,8 - 27[(98 - f_{cm})/100]^2$
10	ϵ_{cp} (‰)					-2,0					-2,2	-2,3	-2,4	-2,5	-2,6	Figure 3.3 $\epsilon_{cp} \geq 60$ Mpa $\epsilon_{cp}(‰) = -2,0 - 0,035(f_{cm} - 60)^{0,25}$
11	ϵ_{cus} (‰)					-3,5					-3,1	-2,9	-2,7	-2,6	-2,6	Figure 3.3 for $f_{cm} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cus}(‰) = -2,6 - 35[(90 - f_{cm})/100]^4$
12	η				2,0					1,75	1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	for $f_{cm} \geq 50$ Mpa $\eta = 1,4 + 23,4[(90 - f_{cm})/100]^4$
13	ϵ_{cs} (‰)				-1,75					-1,8	-1,8	-1,9	-2,0	-2,2	-2,3	Figure 3.4 $\epsilon_{cs} \geq 60$ Mpa $\epsilon_{cs}(‰) = -1,75 - 0,55[(f_{cm} - 60)/40]$
14	ϵ_{cus} (‰)				-3,5					-3,1	-3,1	-2,9	-2,7	-2,6	-2,6	Figure 3.4 $\epsilon_{cus} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cus}(‰) = -2,6 - 35[(90 - f_{cm})/100]^4$

Tableau II.1. Caractéristiques des contraintes et déformations d'un béton normal

II 1.4. Préparation des éprouvettes d'essais

Les éprouvettes d'essais ont été fabriquées dans le laboratoire de génie civil et la composition du béton utilisé dans nos études est détaillée dans le Tableau II.2 et la figure II.6

Tableau II.2: Compositions du béton vibré $C = 350\text{Kg/m}^3$ [F2]

Composant	Composant en poids	Masse volumique	Composant en volume	Poids en %	Composition en poids
Ciment	15,9	3,1	4,94	14,5	350
Sable	40,1	2.64	15,20	36.70	871
Gravier	44	2.65	16,60	40,4	955
Eau	9,30	1.0	9,30	8,50	203
TOTAUX	109,3		46,04	100	2379



Fig.II.6: Préparation du béton

a- Mesure de la densité à l'état frais

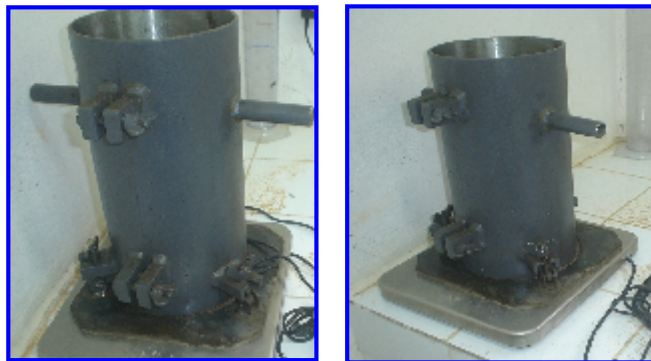
Afin de contrôler la densité du béton, nous avons procédé à des mesures sur cylindres comme le montre le tableau II.3

Tableau II.3: La densité du béton à l'état frais

Éprouvettes	Poids vide(kg)	Poids total(kg)	densité
1	10.40	25.28	2.43
2	10.02	24.78	2.47
3	10.60	25.46	2.40

b- Mesure de la résistance à la compression

La résistance à la compression des bétons a été mesurée par écrasement de cylindres de 200cm² de section et de 32cm de hauteur. Les éprouvettes coulées dans des moules métalliques ont été conservées en laboratoire sans contrôle de la température ni du degré hygrométrique.



• *Fig. II.7: Moules cylindriques utilisés*

Les essais ont été conduits sous vitesse de chargement constante, à raison d'une augmentation de charge de (2à5kg/cm²) par seconde. Enfin la presse utilisée est dotée d'un pupitre à affichage numérique, qui permet le réglage d'un certain nombre de paramètres ainsi que le suivi de l'essai. Ainsi la loi de comportement peut être visionnée et enregistrée pour une interprétation ultérieure

➤ Dimension des éprouvettes

Les éprouvettes sont des cylindres en béton de dimension standard : 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur (Figure II.8). Elles sont soumises à l'essai de compression 28 jours après

coulage. Les éprouvettes sont disposées entre deux plateaux de la presse hydraulique controls model 50-C55G2/L' dont la capacité est de 3000 kN. Le plateau supérieur est mobile en rotation de telle sorte à épouser la surface de l'éprouvette. L'effort vertical est appliqué, par l'intermédiaire du plateau inférieur, progressivement avec une vitesse de chargement constante jusqu'à la rupture de l'éprouvette. L'arrêt de la machine n'est pas automatique, lorsque la force maximale est atteinte l'affichage s'arrête et la machine est stoppée.

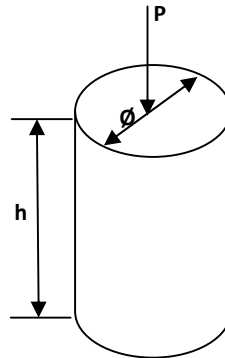


Figure II.8. Schéma et forme des éprouvettes ($h = 32 \text{ Cm}$, $d = 16 \text{ Cm}$)

➤ Machine utilisée

La machine utilisée est une *machine d'essais de compression à affichage DIGIMAX PLUS* figure, à des propriétés illustrées dans le tableau II.4 ci après.

Tableau II.4. Caractéristiques techniques de la machine de compression utilisée.

Capacité (kN)		3000
Cales d'espacements requis	Cylindre 10x20	50-C9084
	Cylindre 15x30	50-C9085
Diamètre des plateaux (mm)		285
Espace vertical (mm)		350
Espace horizontal (mm)		370
Course de piston (mm)		50
Puissance (W)		750
Alimentation		110V-60Hz-1ph
Dimensions (l*p*h) (mm)		970*430*1150
Poids (Kg)		900



Fig II.9 : Machine de compression

c- Comportement en compression des pièces en béton

- Eprouvettes témoins sans renforcement

Dans ce paragraphe, nous allons étudier le comportement des éprouvettes en béton (sans renforcement) sous chargement en compression statique. Dans cette série d'essai, un chargement monotone croissant est directement appliqué sur des éprouvettes saines. les essais de compression du béton témoin après 14 jours ont donné les résultats suivant (tableau II.5)

Tableau II.5 : essais de compression du béton témoin après 14 jours

N°	f_{c14j} (MPa)	moyenne
1	16.10	16.81 MPa
2	17.24	
3	17.09	

Ainsi que les essais de compression du béton témoin après 28jours ont donné les résultats suivant (tableau II.6)

Tableau II.6 : essais de compression du béton témoin après 28 jours

N°	f_{c28j} (MPa)	moyenne
4	28.5	26.58 MPa
5	27.65	
6	23.20	



Fig. II.10 : essais de compression

Le comportement global d'éprouvettes en béton non renforcées sous sollicitation en compression jusqu'à la rupture est décrit par la courbe charge/temps présenté sur la figure II.11

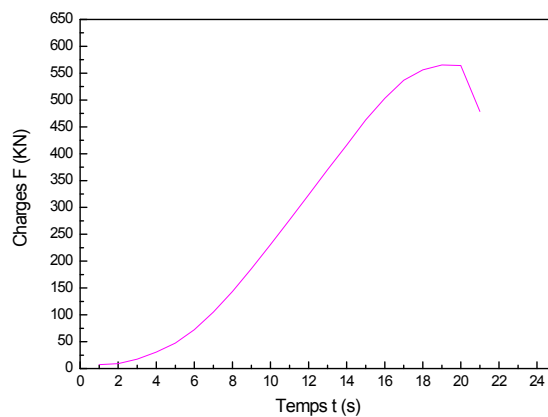


Fig. II.11 : courbe charges /temps des éprouvettes témoins sans renforcement

▪ **éprouvettes témoins avec renforcement**

II.1.5. Matériaux composites :

Les matériaux composites utilisés dans notre étude sont des Tissus en Fibres de carbone, Le SikaWrap-230C, est un tissu de renforcement de structures, à base de fibres de carbone, tissé de façon unidirectionnelle, applicable « à sec » (sans imprégnation préalable).

les fibres de carbone sont à haute résistance, leur constitution et Orientation : des fibres 99% fil de chaîne, 1% fil de trame. Le tissu est muni de fils de trame spéciaux, donnant une bonne stabilité dimensionnelle (heat-set process), son épaisseur est de 0.13mm, facile à appliquer sur des surfaces planes ou courbes (poteaux, cheminées, dômes, silos ...)

- ✓ Insensible à la corrosion
- ✓ Epaisseur faible, même dans le cas d'application de plusieurs couches de tissu
- ✓ Légèreté extrême, permet un renforcement sans alourdir la structure
- ✓ Fibres de maintien latéral pour une meilleure stabilité du tissu

SikaWrap- 230C, est un rouleau d'une largeur de 300 mm et d'une longueur de 50 m (Figure II.12)

II .1.6.la résine:

La colle est une résine synthétique destinée à imprégner le tissu TFC et à assurer la liaison avec le support à renforcer. C'est une résine d'imprégnation époxydique (Figure II.8) , nombre de composants deux, température de mise œuvre 10-35°C ,consistance pâteuse , épaisseur de couche 0.1- 1mm , masse volumique de l' adhésif frais est de 1.31 kg /l (A+B) ;rapport de mélange A : B = 4 :1 (parts en poids)

▪ Préparation de la résine d'imprégnation (colle)

La préparation se fait de la manière suivante : (voir fig. II.14)

Pour la préparation de la résine on verse une quantité de 100 g du composant (B) durcisseur (gris) dans un plateau en aluminium puis la quantité versé est pesé avec une balance de précision 0,01g ,en rajoute ensuite une quantité du composant (A) résine (blanc) pesé avec une précision de 0,01 g. Le mélange est mixé jusqu'au ce qu'il change de couleur (gris clair) La colle ainsi préparer est étalé sur le tissu de carbone qui enveloppe l'éprouvette en béton

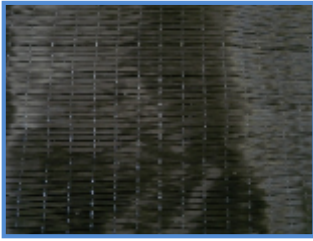


Fig. II.12 : tissu de fibre de carbone



Fig. II.13 : résine époxydique



FigII.14 : Préparation de la résine

Remarque :

La durée de vie en pot débute au moment du mélange de la résine au durcisseur, elle est plus courte à températures élevées et plus longue par basses températures, le fait de mélanger de grandes quantités diminue également la durée de vie en pot.

Pour augmenter le temps de mise en œuvre par température élevée, il est recommandé de diviser la quantité mélangée en petites portions. Une autre mesure efficace consiste à refroidir les composants avant de les mélanger (pas au-dessous de +5 °C).

Température Durcissement complet

+10 °C 7 jours

+23 °C 5 jours

+35 °C 2 jours

Ces valeurs moyennes sont influencées par les changements de conditions atmosphériques.

II.1.7 .Renforcement des éprouvettes témoins par le tissu fer carbone(TFC)

❖ Une seule couche : (figure. II.15)

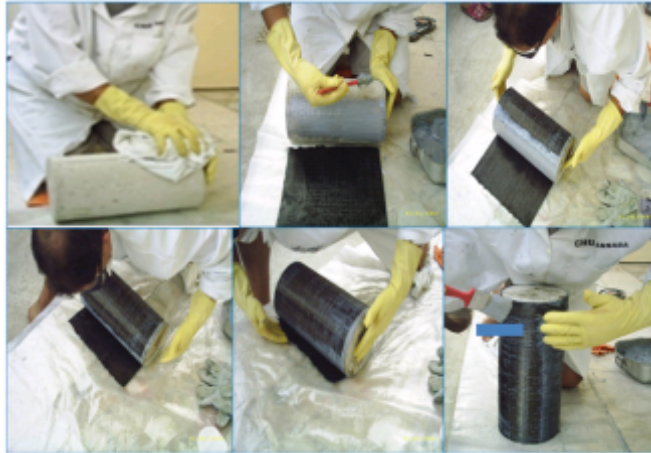


Fig. II.15 : renforcement par une seule couche de TFC

II.1.7 .1 Courbes charges/ temps du béton jusqu'à rupture avec une seule couche

Le tableau ci-dessous résume des éprouvettes renforcées par une seule couche sans dégradation (tableau II.7) :

Tableau. II.7 : éprouvettes renforcées par une seule couche

Une seule couche			
Eprouvettes	Contraintes (MPa)	Charges (KN)	Poids (Kg)
8	41,00	824	14,605
9	39,83	800,8	14,890
10	34,00	683	14,815
Moyenne	38,276	769,26	14,77

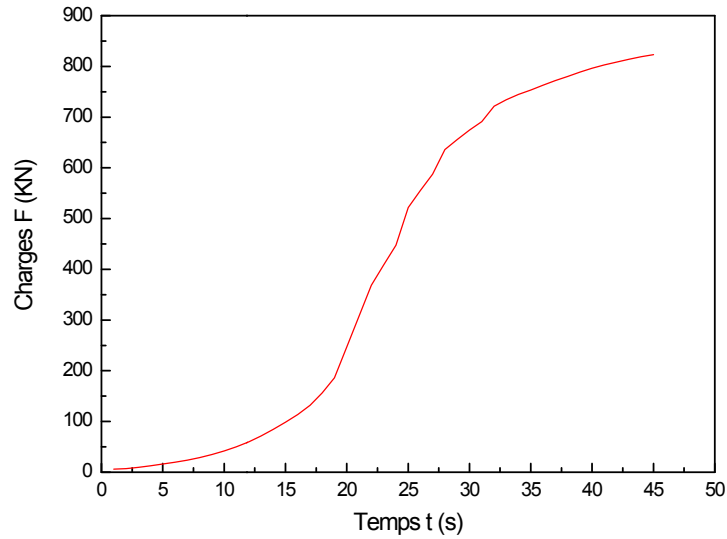


Fig. II.16 : Courbes charges/ temps du béton jusqu'à rupture avec 1 seul couche

▪ Deux couches (figure II.17)

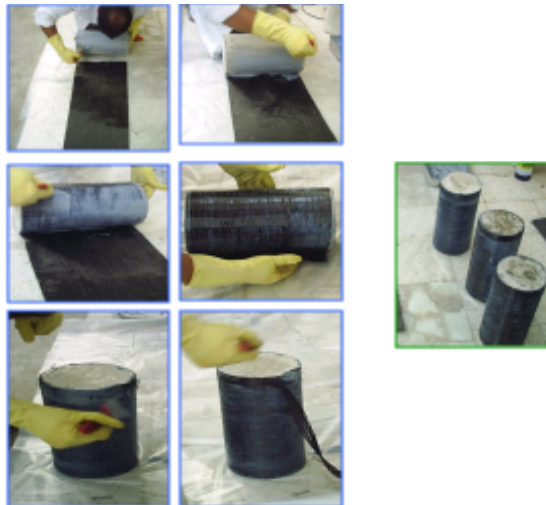


Fig. II.17 : renforcement par deux couches de TFC

II.1.7 .2 Courbes charges/ temps du béton jusqu'à rupture avec deux couches

Le tableau ci-dessous résume des éprouvettes renforcées par deux couches sans dégradation (tableau II.8) :

Tableau. II.8 : éprouvettes renforcées par deux couches

Deux couches			
Eprouvettes	Contraintes (MPa)	Charges (KN)	Poids (Kg)
11	59,18	1189,8	14,960
12	60,07	1207,8	15,210
13	56,10	1127,9	14,925
Moyenne	58,45	1175,16	15,03

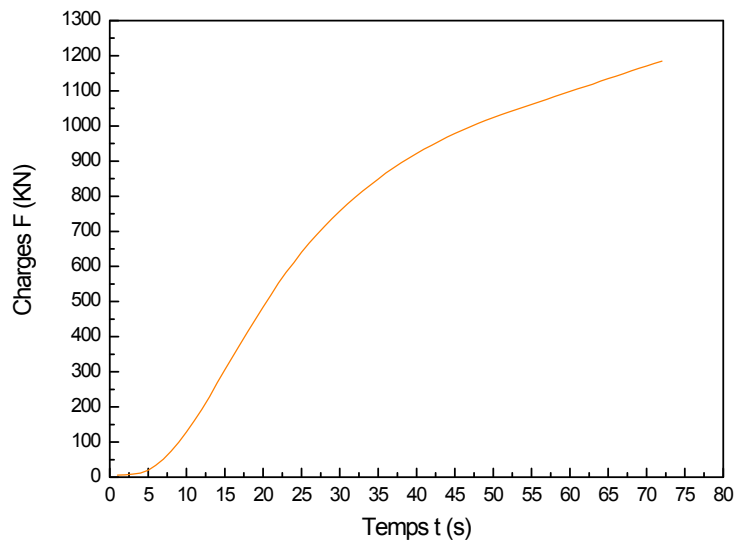


Fig. II.18 : Courbe charges/ temps du béton jusqu'à rupture avec deux couches

II.1.8.Conclusion :

Les essais réalisés au laboratoire sur des éprouvettes saines (non dégradées) montrent, que les performances mécaniques du renforcement par TFC sont bonnes ainsi que l'adhérence entre le béton et le TFC, et sur la participation effective du TFC à la reprise des efforts.

CHAPITRE III

Comportement des pièces pré chargées et renforcées

III-1. Introduction

A la suite de la première partie de l'étude expérimentale sur les comportements de pièces renforcées par des matériaux composites sous chargement en compression statique, nous présentons dans ce chapitre l'étude expérimentale des pièces en béton, initialement pré chargées et puis renforcées par des matériaux composites (TFC, Figure II.7), puis sollicité en compression sous chargement statique.

Tout d'abord, les constituants et leur caractéristique des matériaux utilisés (le béton, et le composite) et les éprouvettes ainsi que les instrumentations utilisées sont présentés dans le (chapitre II)

Les essais de compression sont effectués jusqu'à rupture des éprouvettes. Une première série d'éprouvettes est soumise à une charge jusqu'au rupture finale sans pré chargement , une deuxième séries renforcées sans dégradation(voir chapitre II), et une troisième séries d'éprouvette pré chargées à différents niveaux, puis renforcées par des matériaux composites TFC, puis testées sous chargement de compression jusqu'a rupture.

Le but de pré chargement des éprouvettes est de simulé une dégradation et voir par la suite l'avantage du renforcement des structures en béton, les différents endommagements et les types de rupture sont identifiés.

III-2 Préparation des éprouvettes dégradées

III-2-1 Pré chargement

Avant de coller le TFC, une série d'éprouvettes initialement pré chargées à 30 % et 60%. La procédure de pré chargement consiste à simuler une dégradation dans les éprouvettes. les figures ci-dessous font ressortir les valeurs des contraintes des charges relatifs aux éprouvettes dégradées à 30% et 60%.

Pour cela, on a pris une charge moyenne de 500kN et on a calculé la charge correspondante à 30% et 60% .



Fig. III.1 : Pré chargement à 30%

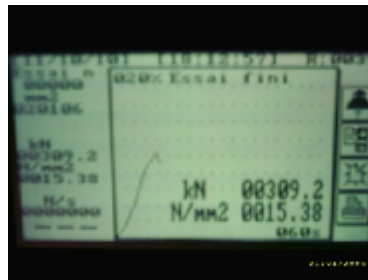


Fig. III.2 : Pré chargement à 60%



pour une valeur moyenne de $f_{c28j} = 25\text{Mpa}$

La dégradation est :

Pour 30% (7----8Mpa)

Pour 60% (15----16Mpa)

III-2-2renforcement par recouvrement en matériaux composite (TFC)

Pour coller le tissu , on suit les étapes suivantes :

- nettoyage de la surface avec un chiffon sec
- application d'une couche de polymère époxyde
- application d'une couche de tissus secs
- laisser sécher pendant un temps (voir chap. II.1.2.3)

Les éprouvettes renforcées par une et deux couches (TFC) sont représentées par les figures (III.3 ; III.4)



Fig III.3 :



Fig III.4 :

III-3- Comportement des éprouvettes prés chargées à (30%) puis renforcées par TFC

III-3-1Eprouvettes pré chargées

Pour les éprouvettes en béton pré chargées à 30 % présenté dans la figure III.5, on

retrouve la première, et une parti de la deuxième phase, déjà décrite pour la poutre témoin en (figure II. 6).

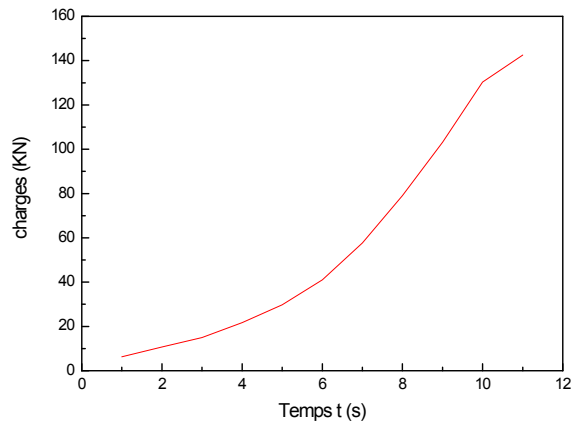
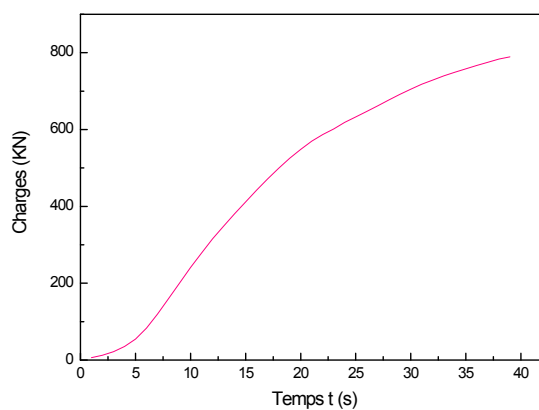


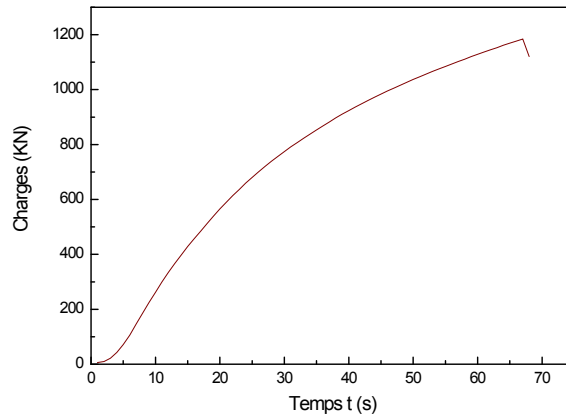
Fig. III.5: Exemple de pré chargement d'une éprouvette à 30% avant renforcement

III-3-2 Eprouvettes pré chargées puis renforcées par TFC (une seule couche)



figIII.6 : Courbe charges/ temps du béton jusqu'à rupture avec une seule couche

III-3-3 Eprouvettes pré chargées renforcées par TFC (deux couches)



figIII.7 : Courbe charges/ temps du béton jusqu'à rupture avec deux couches

Les tableaux ci-dessous font ressortir les valeurs des contraintes, des charges et des différents poids relatifs aux éprouvettes dégradées à 30% renforcées par une et deux couches de TFC : (essai de compression) tableau III.1

Tableau III.1

Eprouvettes	30% (Une seule couche)			30% (Deux couches)			
	Contraintes (MPa)	Charges (KN)	Poids (Kg)	Eprouvettes	Contraintes (MPa)	Charges (KN)	Poids (Kg)
1	$\sigma = 39,27$	789,5	14,795	4	$\sigma = 59,27$	1191,7	15,260
2	$\sigma = 42,19$	848,3	14,780	5	$\sigma = 52,00$	1045	14,940
3	$\sigma = 42,34$	851,3	14,745	6	$\sigma = 61,66$	1239,6	15,110

NB : 1, 2,3 : éprouvettes dégradées à 30% renforcées par une seule couche de TFC

4, 5,6 : éprouvettes dégradées à 30% renforcées deux couches de TFC

III-4- Comportement des éprouvettes prés chargées à (60%) puis renforcées par TFC

III-4-1 Eprouvettes pré chargées

Pour les éprouvettes en béton pré chargées à 60 % présenté dans la figure III.8, on retrouve la première, et de la deuxième phase, déjà décrite pour la poutre témoin en (figure II. 6).

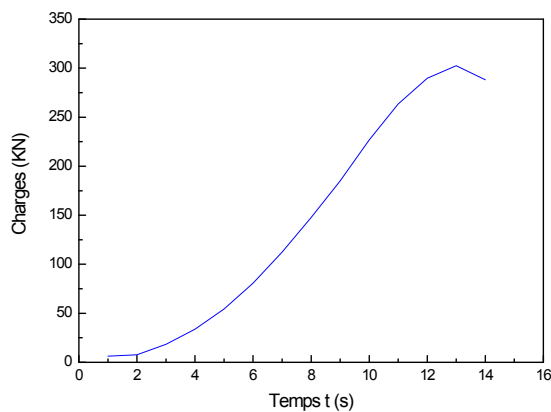


Fig. III.8: Exemple de pré chargement d'une éprouvette à 60% avant renforcement

III-4-2 Eprouvettes pré chargées puis renforcées par TFC (une seule couche)

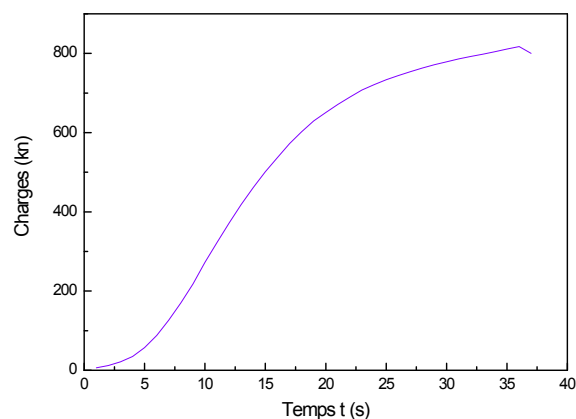


Fig. III.9 : Courbe charges/ temps du béton jusqu'à rupture avec une seule couche

III-4-3 Eprouvettes pré chargées renforcées par TFC (deux couches)

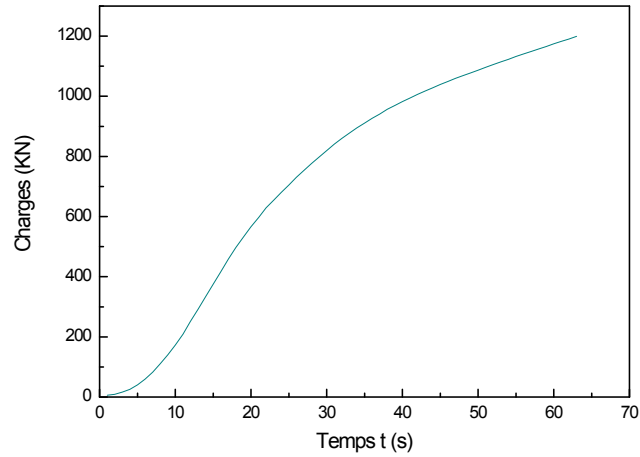


Fig. III.10: Courbe charges/ temps du béton jusqu'à rupture avec deux couches

Les tableaux ci-dessous font ressortir les valeurs des contraintes, des charges et des différents poids relatifs aux éprouvettes dégradées à 60% renforcées par une et deux couches de TFC : (essai de compression) tableau III.2

Tableau III.2

Eprouvettes	60% (Une seule couche)			60% (Deux couches)			
	Contraintes (MPa)	Charges (KN)	Poids (Kg)	Eprouvettes	Contraintes (MPa)	Charges (KN)	Poids (Kg)
7	$\sigma = 42,50$	854,5	14,70 0	10	$\sigma = 59,65$	1199,2	15,040
8	$\sigma = 40,88$	822,40	14,69 5	11	$\sigma = 61,43$	1235,2	14,940
9	$\sigma = 43,50$	874,7	14,600	12	$\sigma = 67,21$	1351,3	15,370

III-5- Mode de rupture

III-5-1 Eprouvettes prés chargées à (30%) puis renforcées par TFC

❖ Une seule couche



Fig. III.11 Eprouvettes prés chargées à (30%) puis renforcées par TFC Une seule couche

Commentaire :

Suite aux essais illustrés ci-dessus (30% - Une Seule Couche), il nous est donné de constater que la rupture du composite est observée, seulement, au niveau de la partie inférieure de l'éprouvette.

Nous remarquons également, que suite à ce déchirement il existe du béton collé à ce composite.(figure III.11)

❖ Deux couches



Fig III.12 Eprouvettes prés chargées à (30%) puis renforcées par TFC(deux couches)

Commentaire :

Suite aux essais illustrés ci-dessus (30% - Deux Couches), il nous a été donné de constater que la rupture du composite est observée, encore une fois, au niveau de la partie inférieure de l'éprouvette seulement.

Nous remarquons également qu'il y a eu un arrachement brusque du composite sous forme de couronne (figure.III.12)

III-5-2 Eprouvettes prés chargées à (60%) puis renforcées par TFC

❖ Une seule couche



Fig. III.13 Eprouvettes prés chargées à (60%) puis renforcées par TFC (une seule couche)

Commentaire :

Suite aux essais illustrés ci-dessus (60% - Une Seule Couche), il nous a été donné de constater que la rupture du composite est observée, seulement, au niveau de la partie supérieure de l'éprouvette.

Nous remarquons également, que suite à ce déchirement il existe du béton collé à ce composite.

❖ Deux couches



Fig. III.14 Eprouvettes prés chargées à (60%) puis renforcées par TFC(deux couches)

Commentaire :

Suite aux essais illustrés ci-dessus (60% - Deux Couches), il nous a été donné de constater que la rupture du composite est observée, encore une fois, au niveau de la partie supérieure de l'éprouvette seulement.

Nous remarquons également qu'il y a eu un arrachement brusque du composite sous forme de couronne .

Cas particulier :

Nous avons obtenus suite à des essais réalisés avec une dégradation de plus de 80% :

- Rupture longitudinale intégrale du composite
- La Ruine du béton (Voir Fig III.15)
- L'existence de béton collé au Tissu (TFC)



Fig.III.15 Eprouvettes prés chargées à plus de (80%) puis renforcées par TFC

Commentaire :

Nous constatons que le niveau de détachement diffère par rapport au pourcentage de dégradation, indépendamment du nombre de couches confinées.

Quand il s'agit d'une dégradation de 30%, le détachement du renfort s'effectue au niveau de la partie inférieure de l'éprouvette. Pour un seuil de dégradation à 60% celui-ci se fait au niveau de la partie supérieure.

Conclusion générale

Le renforcement des éléments en béton par composite permet d'apporter des gains significatifs en terme de résistance aux structures endommagées. Le composite peut compenser la perte de rigidité des éprouvettes due à la fissuration du béton en compression et augmenter la capacité portante des éprouvettes jusqu'à 150%. Le composite permet également de limiter l'ouverture excessive des fissures, de rendre la structure moins fragile et de modifier complètement le mode de ruine.

Les résultats obtenus sur l'étude du renforcement des éprouvettes confinées recouvertes par des matériaux composites (TFC) sous chargement uni axiale en compression permettent de dégager les conclusions suivantes :

- ✓ *Augmentation considérable des performances mécaniques en compression (entre 70 et 160%) ;*
- ✓ *Augmentation de la résistance en compression des éprouvettes renforcées comparativement aux éprouvettes témoins sans renforcement ;*
- ✓ *La colle possède des caractéristiques mécaniques très faibles comparativement aux tissus.*
- ✓ *L'étude de l'influence du taux de chargement des éprouvettes (30 et 60%) puis confinées par du TFC révèle que :*
- ✓ *le comportement charge/temps s'effectue en trois niveaux : le premier est le deuxième correspondent au comportement du béton alors que le troisième dépend du TFC.*
- ✓ *le mode de rupture n'est pas le même pour une éprouvette pré chargée à 30 et à 60%.*
- ✓ *le renforcement a retardé l'apparition des premières fissures sur les éprouvettes au début du chargement.*

L'utilisation des TFC dans le renforcement des structures existantes et la réparation des ouvrages endommagés montre que cette technique peut, dans beaucoup de cas, être une excellente alternative aux solutions traditionnelles.

Liste des figures

Chapitre I

- Fig.I.1: Corrosion des armatures
- Fig.I.2 : Délamination du béton d'un hourdis de pont aboutissant à la formation d'un trou
- Fig.I.3: Choc sur une pile de pont
- Fig.I.4: Composants du composite
- Fig.I.5: Résistance ultime pour différents types de fibres de carbone
- Fig.I.6: Armures classiques de tissus techniques
- Fig. I.7: Photo de divers tissus Unidirectionnels
- Fig. I.8 : Fibre de verre
- Fig. I.9: Fibre de carbone
- Fig. I.10: Fibre d'aramide
- Fig. I.11: Les unidirectionnels (UD)
- Fig. I.12: Toile ou taffetas
- Fig. I.13: Serge
- Fig. I.14: Satin
- Fig. I.15: Armures bi ou tridimensionnelles
- Fig. I.16 : Tissu hybride carbone – aramide
- Fig. I.17 : Renforcement par fibres sèches. Enroulement automatisé
- Fig. I.18 : décollement du renfort - le peeling-off-
- Fig. I.19 : Procédé par collage de plaques (Sika, 1996)
- Fig. I.20 : le comportement en fatigue
- Fig. I.21 : éléments de structure pouvant être renforcé par des matériaux composites
- Fig. I.22 :. Réhabilitation du pont Kattenbusch en Allemagne
- Fig. 1.23 :. Confinement de colonnes de ponts par matériaux composite
- Fig. 1.24 :. Réhabilitation d'un mur en maçonnerie (Suisse)
- Fig. 1.25 : Renforcement d'une dalle de pont
- Fig. 1.26 :. Réhabilitation du pont d'elHarrach, Alger

Chapitre II

- Fig. II.1 :. Courbes typiques contraintes-déformation
- Fig. II.2 : Diagramme contraintes-déformations du béton
- Fig. II.3 : Diagramme parabole-rectangle des contraintes-déformations d'un béton comprimé
- Fig. II.4 : Diagramme bilinéaire des contraintes-déformations du béton
- Fig. II.5 : Diagramme contraintes-déformations d'Hognestad
- Fig. II.6 : préparation du béton
- Fig. II.7 : moules cylindriques
- Fig. II.8 : Schéma et forme des éprouvettes ($h = 32 \text{ Cm}$, $d = 16 \text{ Cm}$)
- Fig. II.9 : Machine de compression
- Fig. II.10 : essais de compression

Fig. II.11 : courbe charges /temps des éprouvettes témoins sans renforcement
Fig. II.12 : tissu de fibre de carbone
Fig. II.13 : résine époxydique
Fig. II.14 : préparation de la résine
Fig. II.15 : renforcement par une seule couche de TFC
Fig. II.16 : Courbes charges/ temps du béton jusqu'à rupture avec 1 seul couche
Fig. II.17 : renforcement par deux couches de TFC
Fig. II.18 : Courbe charges/ temps du béton jusqu'à rupture avec deux couches

Chapitre III

Fig.III.1 : pré chargement à 30%
Fig.III.2 : pré chargement à 60%
Fig.III.3 :éprouvettes renforcées par une seul couche
Fig.III.4 :éprouvettes renforcées par deux couches
Fig.III.5 :Exemple de pré chargement d'une éprouvette à 30% avant renforcement
Fig.III.6 : Courbe charges/ temps du béton jusqu'à rupture avec une seule couch
Fig.III.7 : Courbe charges/ temps du béton jusqu'à rupture avec deux couches
Fig.III.8 : Exemple de pré chargement d'une éprouvette à 60% avant renforcement
Fig.III.9 : Courbe charges/ temps du béton jusqu'à rupture avec une seule couche
Fig.III.10 : Courbe charges/ temps du béton jusqu'à rupture avec deux couches
Fig.III.11 : Eprouvettes prés chargées à (30%) puis renforcées par TFC Une seule couche
Fig. III.12 :Eprouvettes prés chargées à (30%) puis renforcées par TFC(deux couches)
Fig. III 13 : Eprouvettes prés chargées à (60%) puis renforcées par TFC(une seul couche)
Fig. III.14 : Eprouvettes prés chargées à (60%) puis renforcées par TFC(deux couches)
Fig. III.15 : Eprouvettes prés chargées à plus de (80%) puis renforcées par TFC

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Principales causes de dégradation des bétons
Tableau I.2 : Origine des dommages dans les structures en béton
Tableau I.3 : Propriétés des fibres
Tableau I.4 : Caractéristiques moyennes des fibres et renforts
Tableau I.5 : Propriétés mécaniques des résines époxydiques
Tableau I.6 : Comparaison entre les plaques d'acier et celles de composites

Tableau II.1 : Caractéristiques des contraintes et déformations d'un béton normal
Tableau II.2 : Compositions du béton vibré $C = 350\text{Kg/m}^3$
Tableau II.3 : résultats des essais de la densité à l'état frais
Tableau II.4 : Caractéristiques techniques de la machine de compression utilisée
Tableau II.5 : essais de compression du béton témoin après 14 jours
Tableau II.6 : essais de compression du béton témoin après 28 jours
Tableau II.7 : éprouvettes renforcées par une seule couche de TFC
Tableau II.8 : éprouvettes renforcées par deux couches de TFC

Tableau III.1 : éprouvettes dégradées à 30% renforcées par une et deux couches de TFC
Tableau III.2 : éprouvettes dégradées à 60% renforcées par une et deux couches de TFC

Références

- [A1] ASSOCIATION FRANÇAISE DE GENIE CIVIL. Recommandations du groupe de travail concernant : « Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de composites à matrice organique » ; Bilan de l'activité 1999-2000 ; (2000).
- [A2] AGOUZOUL, S., *Renforcement en flexion des poutres en béton armé par des plaques en PRF : étude du cisaillement et du transfert de contraintes dans les plaques*, Mémoire de maîtrise, Spécialité génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, Décembre (1999)
- [B] Benzaid R. « Contribution à l'étude des matériaux composites dans le renforcement et la réparation des éléments structuraux linéaires en béton. » THESE DE DOCTORAT Université Mentouri- Constantine, Algérie Juillet(2010)
- [C1] CALGARO J.A. et LACROIX R. « Maintenance et réparation des ponts », Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, (1997).
- [C2] CRMA glossaire des matériaux composites « octobre 2006 »
- [D1] David H. Comportement mécanique de poutres en béton armé renforcées ou réparées par collage de matériaux composite Etude expérimentale et numérique, Thèse de doctorat. ARRAS : Université d'Artois, 1999, pp 83-158. (1999).
- [D2] Deloye F.X., Identification rapide des ciments sur chantier. Bulletins liaison Laboratoire des ponts et chaussées. Mai-Juin (1989). P 65-70.
- [E1] ENQUETE DU SETRA. « Ouvrages d'art réhabilitation, un diagnostic plus sévère que prévu », *Le Moniteur*, 26,(1995).
- [E2] El Houssain R. « contribution a l'analyse du comportement mecanique de dalle en beton arme renforcees par materiaux composites », these de doctorat universite clude bernard 6 lyon 1,(2004).
- [E3] COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION, *Eurocode 2: Calcul des structures en béton - Partie 1: Règles générales et règles pour les bâtiments*, Afnor, (1992).
- [F1] Ferrier E.: Comportement de l'interface composite-béton sous des sollicitations de fluage thermostimulé et en fatigue oligocyclique. Application au calcul previsionnel de la durabilité de poutres BA renforcées, thèse de doctorat, Université Lyon1 ,(1999).
- [F2] Ferrier E., Concrete beams reinforced by fiber-reinforced plastics: the effect of temperature on the adhesive layer, journal Composites Science and Technology, Volume 61, Issue 3, pp 425-431, February, (2001)
- [F3] Ferhani k. memoire de magister « étude de l' absorption d' eau des bétons auto-plaçant » (2010)
- [G] Green M. F. et al., Effects of freeze-thaw action on bond of FRP sheets to concrete, CDCC98, Université de Sherbrooke Canada, (1998)

- [H]. Hamelin: Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites. Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites. (2002).
- [K] KARBHARI, V., *Durability of frp composites for civil infrastructure –myth, mystery or reality*, Department of Structural Engineering University of California, Presentation Power Point, (2000), Consultable sur le site [NET 05].
- [L1] L'Hermite: Béton armé d'armatures collées. Colloque Rilem, 4-6 sept. 1967, Paris, p.175-203. (1967)
- [L2] LAPIERRE, P., *Modélisation de poutres en béton armé renforcées de matériaux composites*, Mémoire de maîtrise, Spécialité génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, Mars (1999).
- [L3] Labossière P., Neale K. W. et Nishizaki, Effect of different long-term climatic conditions on PRF durability, Proceeding of the International Conference on Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6), Singapore, 8- 10 July 2003. p. 779-784
- [M] Mohamed.I,
Contribution à l'étude du confinement du béton alcali-réactif par matériaux composites carbone époxy, thèse de doctorat, Université Lyon1,(2004).
- [M1] MEIER.U « Strengthening of structures with Carbon-Fiber/Epoxy laminates », *Construction and Building Materials*, 9(6), 341-351, 1995
- [P] PARK, R., PAULAY, T., *Reinforced concrete structures*, John Wiley & Sons, New-York, (1975).
- [R] PERCHAT, J., *Règlements étrangers de béton armé, Etude comparatives des codes CEBBSI-DIN-ACI*, Cour du CHEC, Editions Eyrolles, (1982).
- [T1] TORAY technologies, Relevant Issues of Carbon Fiber for the Emerging Wind Market, Toray Carbon Fibers America, Inc., document technique 2004 fiche technique TORAY 2004
- [T2] Taerwe L., Matthys S. FRP Reinforcement for Concrete Structures:
- [U] Uomoto T., Durability design of GFRP rods for concrete reinforcement, Proceeding of the 6th International Conference on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6), Singapore, 8-10 July 2003. p. 37-50
State-of-the-Art, Proc *IABSE Symposium*, p. 578-585. (1999)
- [V] Vénuat M.: La pratique des ciments mortier et béton, Moniteur technique, éditions du moniteur, (1989)
- [Z] 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. Thèse de doctorat. Ecole nationale des ponts et chaussées(2004),

NETO GRAPHIE :

- [NET 01] <http://www.sika.com>
- [NET 02] <http://www.meca.insa-toulouse.fr>
- [NET 03] www.afgc.asso.fr
- [NET 04] http://scd.docinsa.insa-lyon.fr/voir_tout2p.php
- [NET 05] <http://www.rb2c.umr.edu>

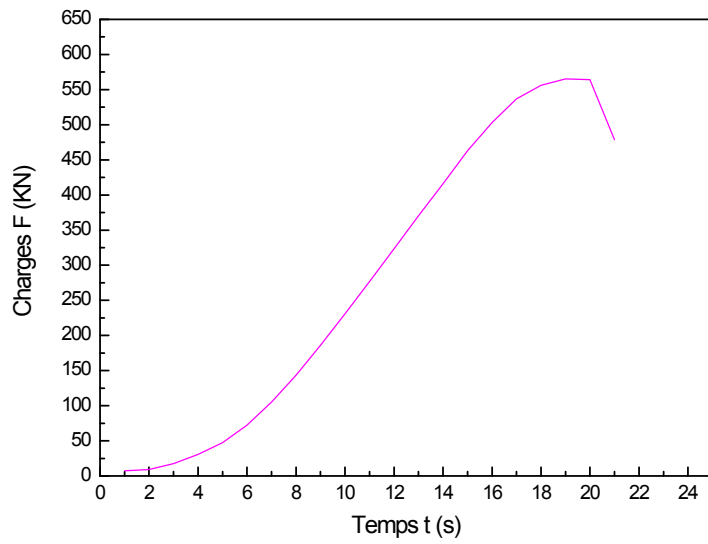
ANNEXE A

Fiches techniques des matériaux utilisés

ANNEXE B

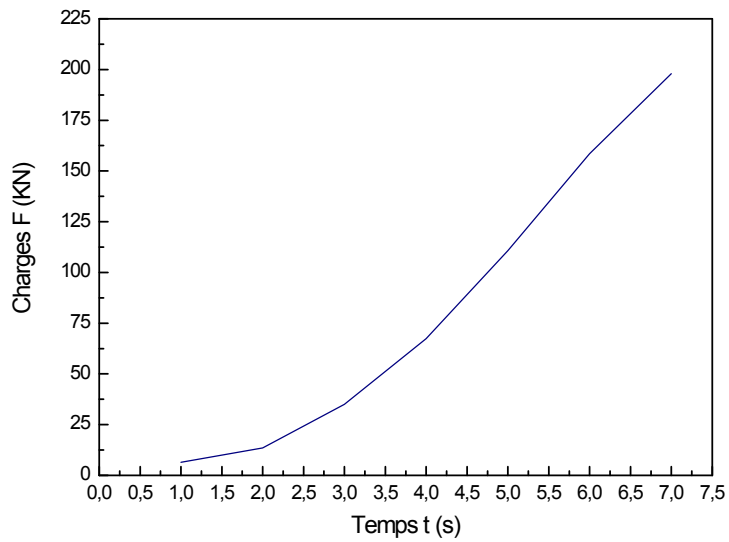
Courbe charges /temps des autres éprouvettes

Y5



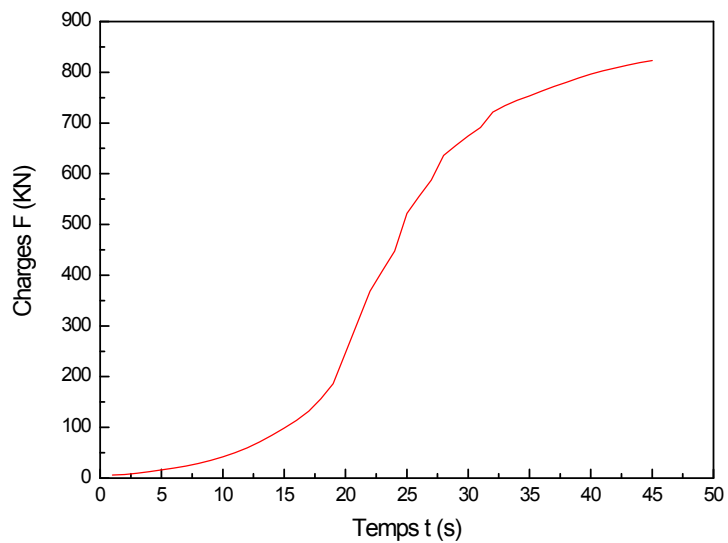
Eprouvette saine

Y'1

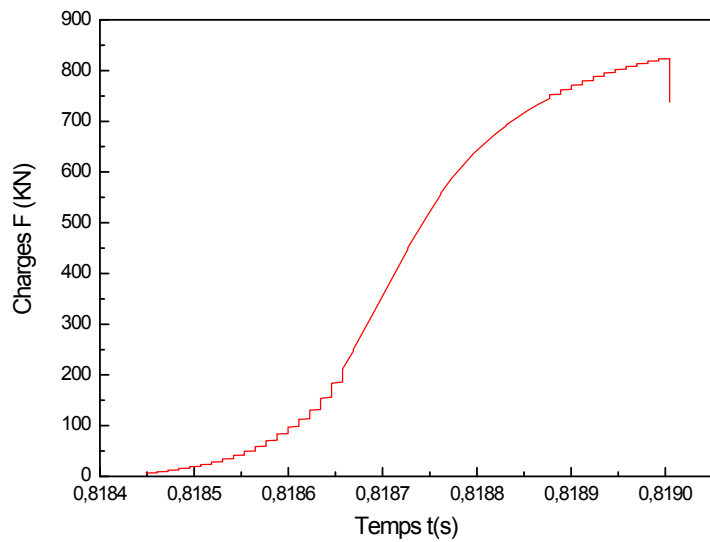


Eprouvette pré chargée à 30%

A1

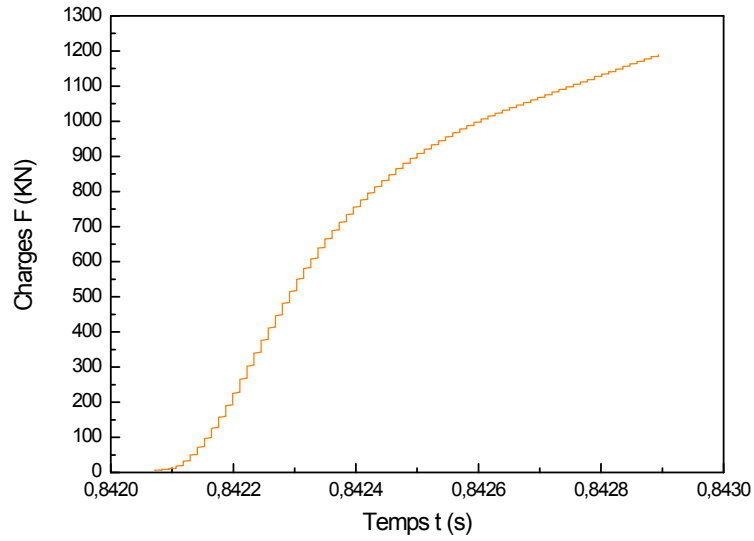


Eprouvette saine avec renforcement (une seule couche) sans doublon

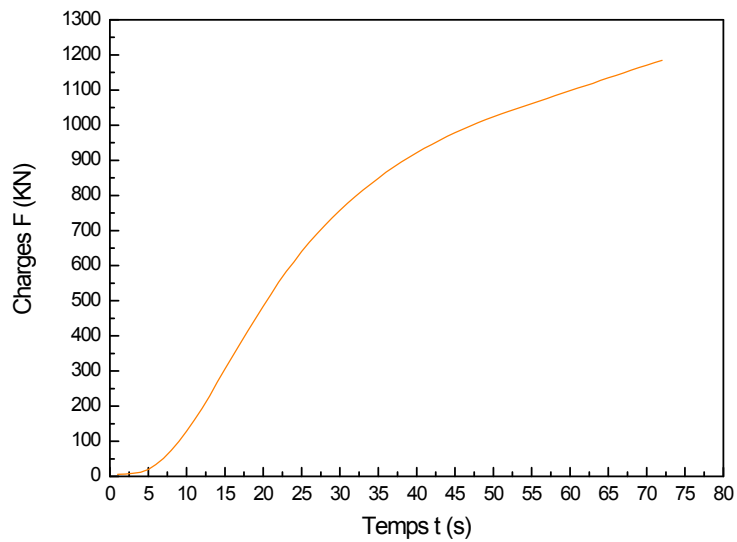


Eprouvette saine avec renforcement (une seule couche)

B1



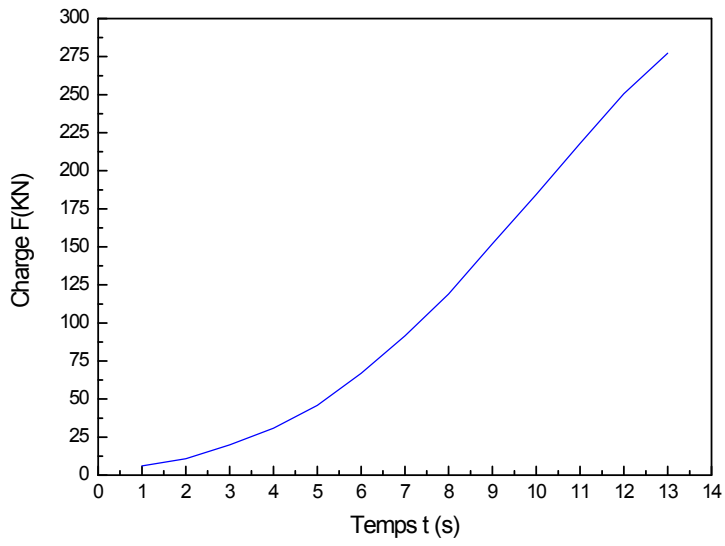
Eprouvette saine avec renforcement (deux couches)



Eprouvette saine avec renforcement (deux couches)

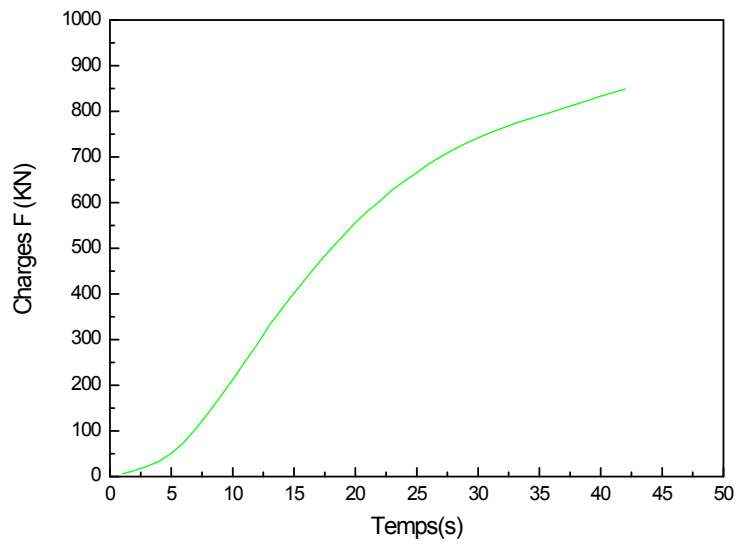
Sans doublon

M1



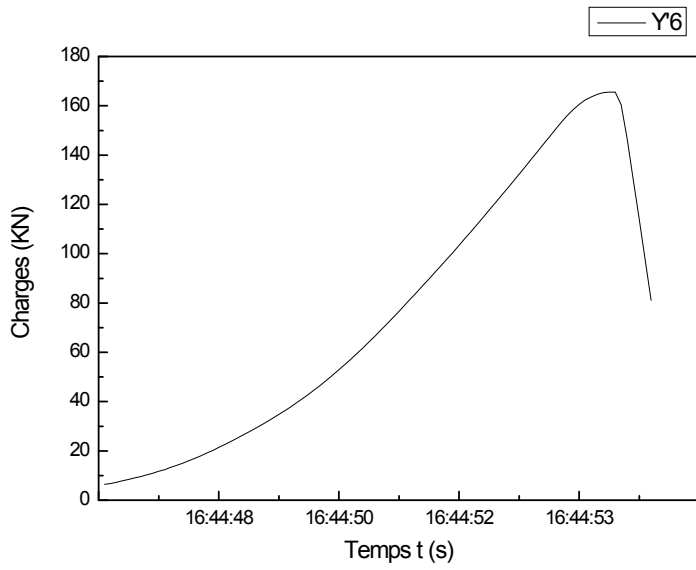
Eprouvette dégradée à 60%

K1

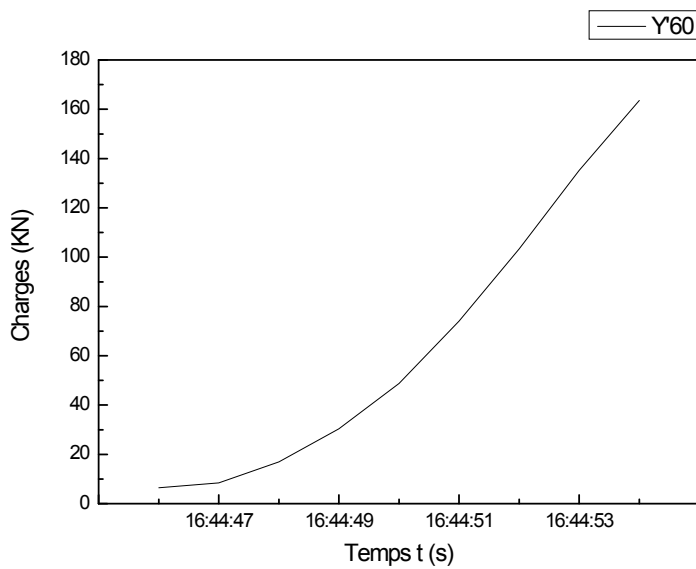


Eprouvette dégradée à 60% renforcée
par (une seule couche)

Sans doublon



Eprouvette dégradée à 30%
avec doublon



Eprouvette dégradée à 30%
Sans doublon