

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
UNIVERSITE DE M'HAMED BOUGARA - BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie des Procédés

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme Master 2

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Filière : Génie Civil

THEME

**Renforcement des poutres par des
composites textiles mortier**

Réalisé par :

BERIOUECHE HOCINE

CHABLA ALI

Proposé et suivi par :

Mr GHERNOUTI. Y-

Année universitaire 2017-2018

Remerciements

Je rends grâce à Dieu le tout puissant de m'avoir donné le savoir et la volonté surtout la patience pour réaliser ce modeste travail.

Je tien à remercier profondément et sincèrement tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail et toutes les personnes qui m'ont aidé, conseillé, orienté et encouragé.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur Mr. GHERNOUTI Youcef pour son suivi et ses conseils durant l'évolution de ce modeste travail.

Nous adressons un grand remerciement à tous les enseignants du département génie des matériaux.

Comme nous remercions le chef département de laboratoire central des travaux public (LCTP) et son groupe pour nos avoir guider à faire ce travail.

Enfin,

Merci a tous ceux et toutes celles qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, qu'ils trouvent ici l'expression de nos sincères remerciement.

Dédicaces

*Au nom de l'amour de l'obéissance et du respect, je dédie ce travail :
A mes très chers et adorables parents qui son toujours ma source de
courage et de réussite.*

*Mon père qui ma toujours traité comme responsable,
Ma très chère mère que dieu me la garde inchallah.*

*A mes très chères frères et sœurs,
A toute ma famille, grand et petit,*

A mon collègue « ALI »

A tous mes chers amis sans exception

HOCINE.



Dédicaces

*Au nom de l'amour de l'obéissance et du respect, je dédie ce travail :
A mes très chers et adorables parents qui son toujours ma source de
courage et de réussite.*

*Mon père qui ma toujours traité comme responsable,
Ma très chère mère que dieu me la garde inchallah.*

A mes très chères sœurs et mon petit frère.

*A toute ma famille grands et petite,
mon collègue « HOCINE »
et A tous mes amis.*

ALI.



Résumé

L'objectif de ce travail est l'étude comparative du comportement des poutres en béton renforcées par deux techniques :

- Le renforcement par collage des polymères renforcés en fibre (PRF) à l'aide d'une résine époxy.
- Renforcement par des composites textiles mortiers en anglais Textiles Reinforced Morter (TRM) par collage des grilles à l'aide d'un mortier.

Au total vingt-sept (27) éprouvettes (poutres) de section (15*15) cm², et d'une longueur de 60 cm, ont donc été fabriquées à l'aide d'un mélange de béton de résistance à la compression 32MPa à 28 jours.

L'analyse a été faite par une étude expérimentale sur neuf (9) variantes dont une (1) de ces variantes représente le béton de référence (BT).

Le renforcement par PRF s'effectue par collage des tissus en carbone ou verre sur la surface tendue des poutres, et celui par TRM s'effectue par collage des grilles en fibre de verre ou métallique sur la surface tendue et les surface latérales des poutres à l'aide d'un mortier.

L'essai de flexion 3 points effectué nous a confirmé que tous les types de renforcement présentent un gain de charge à la rupture qui change d'une variante à une autre, ce qui prouve l'efficacité de renforcement avec les deux techniques.

Cette étude nous a confirmé que le renforcement en PRF ce n'est pas la seule solution de réhabilitation des structures en béton, car la technique de renforcement par les TRM donne des résultats proche aux PRF.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	01
Problématique	02
 <u>Chapitre I : Pathologie des structures en béton</u>	
I.1. Introduction	03
I.2. Différentes pathologies de béton	04
I.2.1. Défauts mécaniques d'ordre structurel	04
I.2.2. Réactions de gonflement interne	05
I.2.2.1. Réaction alcali-granulats	05
I.2.2.2. Réaction sulfatique interne (RSI)	05
I.2.3. Dégradations liées à l'environnement	06
I.2.3.1. Gel / Dégel –Action des sels	06
I.2.3.2. Eaux et sols acides	07
I.2.3.3. Attaques sulfatiques	07
I.2.3.3. Milieu marin	08
a. Facteurs physiques	08
b. Facteurs chimiques	08
I.2.4. La corrosion des armatures	08
I.2.4.1. Carbonatation	08
I.2.4.2. Action des chlorures	09
I.2.4.3. Fissuration et éclatements	09
I.2.4.3.1. Fissuration accidentelle	10
a) Le ressuage	10
b) Le retrait plastique	10
c) Le retrait thermique	10
d) Le retrait hydraulique	11
I.2.4.3.2. Fissuration fonctionnelle mécanique	11
I.2.4.3.3. Fissuration fonctionnelle thermique	12

Chapitre II : Technique de réparation et renforcement

II.1. Introduction	13
II.2. Renforcement par une précontrainte additionnelle	14
II.3. Renforcement par gainage métallique	15
II.4. Projection du béton	15
II.4.1. Description des deux méthodes	16
A. Projection par voie sèche	16
B. Projection par voie mouillée	17
II.4.2. Avantages des deux méthodes	17
II.4.3. Inconvénients des deux méthodes	17
II.5. Le renforcement au moyen de profilés métalliques	17
II.6. Adjonction de matériaux composites (Polymères Renforcés en Fibres)	18
II.6.1. Les fibre de carbone	19
II.6.1.1. Elaboration des fibres de carbone	19
II.6.1.2. Les caractéristiques mécaniques des fibres de carbone	20
II.6.2. Fibres de verre	20
II.6.3. Fibres d'aramides	20
II.6.3.1. Elaboration des fibres d'aramides	20
II.6.4. Polymères renforcés de fibre (PRF)	20
II.6.4.1. Intérêt des polymères renforcés de fibres (PRF) dans le bâtiment et les travaux public	21
II.6.4.2. Principaux inconvénients des (PRF)	21
II.6.4.3. Technique de renforcement	22
II.6.4.4. Les avantages du renfort au moyen de matériaux composites	22
II.6.4.5. Quelques applications des matériaux composites (PRF) en génie civile	23
A. Les poutres	23
B. les dalles	24
C. les colonnes	25
D. assemblage poteau-poutre	26
II.6.4.6. Caractéristique des produits de renforcement	27

Chapitre III : caractérisation des matériaux

III.1. introduction	28
III.2. objectif de travail	28
III.3. Caractéristiques des matériaux utilisés	28
III.3.1. Ciment	28
III.3.2. Les granulats	29
III.3.3. Eau de gâchage	32
III.4. Composition de béton	33
III.4.1. Propriétés de béton	33
III.5. Matériaux de réparation	33
III.5.1. les fibres de carbone	33
III.5.2. Les tissus de fibre de verre	34
III.5.3. La résine	35
III.5.4. Le mortier de réparation	36
a. Sika- Latex	36
b. Fumé de Silice	37
III.5.5. Les grilles en fibres de verres	38
III.5.6. Les Grilles métalliques	39
III.6. Essai de traction sur les grilles	40

Chapitre IV : Description des types de renforcements

IV.1. Description des poutres testées	42
IV.2. Procédures de mise en œuvre des poutres	42
IV.3. Notation des poutres testées	44
IV.4. Mode de renforcement	46
IV.4.1. Collage des grilles de composite par mortier (TRM)	46
IV.4.1.1. Application de mortier sur les poutres pour collage de grilles	48
IV.4.1.2. Collage des matériaux composites (tissus)	51
A- Préparation du support béton	51
B- Préparation de tissus composites (PRFC et PRFV)	51
C- Préparation de la colle Sika-dur-330	52
D- Etapes d'application sur le support	52

Chapitre V : Résultat et discussions

V.1. Procédures d'essai de flexion	55
V.2. Essai de flexion des poutres	56
V.2.1. béton de référence (BT)	56
V.2.2. les poutres renforcées en fibres de polymères (PRF)	57
V.2.3. sur les poutres renforcées en TRM (Textile Reinforced Mortel)	59
V2 .3 .1 Effet de type du renfort et de nombre de couche différent	59
A. TRM en grille de verre	59
B. TRM en grille métallique	61
V.2.3.2 Effet de géométrie et type de renfort	63
V.2.3.3 comparaison entre les TRM selon type de renfort (GV2 et GM2C)	65
V.3. comparaison des variantes	67
V.3.1. PRF avec les TRM (GM2C et GV2C) selon le type et nombre de couche	67
V.3.2. TRM selon la géométrie et le nombre de couche de renforcement	69
V.3.3. les PRF avec les TRM selon leur type et géométrie	70
V.4. Mode de rupture des poutres	71
A. Rupture de béton témoin (BT)	71
B. rupture des poutres renforcées PRF	72
C. Rupture des poutres renforcées par des TRM	73
V.5. conclusion	74
Conclusion générale	75

INTRODUCTION GENERALE

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception des matériaux utilisés, de sa réalisation ainsi que des diverses conditions d'usage d'exploitation et de maintenance. Le béton résiste au temps qu'il fait et au temps qui passe. Mais les ouvrages en béton peuvent nécessiter des opérations de réparation ou de renforcement pour augmenter leur durée d'utilisation ou offrir de nouvelles fonctionnalités. De nombreuses solutions techniques sont disponibles et maîtrisées, elles ont fait la preuve de leur efficacité et répondent à l'ensemble des problèmes potentiels rencontrés sur les matériaux ou sur les structures. Il convient de choisir la solution technique adaptée à la pathologie à traiter.

Le béton ordinaire constitue certainement l'un des matériaux de construction les plus durables. Certains ouvrages demeurent en excellent état après plus d'un siècle d'exploitation sous des conditions climatiques particulièrement rigoureuses et sévères. Il est quelquefois surprenant de constater que certains ouvrages récents présentent une détérioration importante, cela nécessitera une protection et une maintenance appropriée. Ces désordres rencontrés sont très souvent dus au vieillissement des matériaux, ce qui a une incidence directe sur la durabilité du béton. Dans tous les cas, il est impérativement indispensable de procéder à des méthodes, soient de renforcement, soient de réparation, et cela suite à une inspection d'analyses et de méthodologie d'un bon diagnostic. Ces travaux de renforcement ou de rénovation des structures, ont essentiellement pour but de renforcer ou remédier à des désordres survenus au cours du temps et causés soit par des agressions physico-chimiques, soit par un phénomène de fatigue sous des chargements cycliques ou suite à des sollicitations accidentelles.

A cet effet, ce mémoire est devisé en deux parties :

La première partie consiste sur les pathologies et les techniques de renforcement et réhabilitation des structures en béton.

La deuxième partie est les protocoles expérimentaux, la confection et l'élaboration des éprouvettes et leurs renforcements par des différents techniques.les résultats expérimentaux en terme force/déplacement seront représenté avec leurs discussion et interprétations.

Enfin ce travail est terminé par une conclusion générale rappelant les principaux résultats.

Problématique :

Dés leurs premières applications, les techniques de réparation des structures en béton armé au moyen de matériaux composites ont démontré d'excellentes performances et se sont révélés être nettement plus efficaces, fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés de renforcement traditionnels. L'introduction dans le domaine du génie civil de ces matériaux composites de type polymère renforcés de fibres (PRF), présente de nombreux avantages fonctionnels tels que : Une légèreté du tissu, une mise en œuvre aisée, une liberté de formes.

Ces composites permettent aussi d'augmenter la durée de vie de certaines structures ou éléments structurels grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs.

Cette technique de renforcement présente des inconvénients vis-à-vis des hautes températures (feu et incendie), et son coût élevé qui nous empêche de l'utiliser.

Cela a longtemps découragé l'utilisation des PRF dans le bâtiment. Dans ce but, un nouveau système de renforcement est en cours de développement dans lequel le mortier est employé comme matrice pour des grilles composites.

CHAPITRE I

Pathologie des structures en béton

CHAPITRE I : Pathologie des structures en béton

I.1. Introduction :

Le béton ordinaire constitue certainement l'un des matériaux de construction les plus durables. Certains ouvrages demeurent en excellent état après plus d'un siècle d'exploitation sous des conditions climatiques particulièrement rigoureuses et sévères. Il est quelquefois surprenant de constater que certains ouvrages récents présentent une détérioration importante, cela nécessitera une protection et une maintenance appropriée. Ces désordres rencontrés sont très souvent dus au vieillissement des matériaux, ce qui a une incidence directe sur la durabilité du béton. [1]

Les différentes pathologies pouvant affecter les bétons :

Ces pathologies sont de deux types principaux : Mécaniques, Physico-chimiques.

Parmi les premières, on rencontre essentiellement des phénomènes de fissuration, liés à des problèmes structurels.

Dans les secondes, on peut citer :

- Les réactions de gonflement internes (RSI et alcali-réaction),
- La dégradation du béton par l'environnement,
- Les phénomènes de corrosion des armatures,
- Les désordres consécutifs à un incendie.

CHAPITRE I : Pathologie des structures en béton

I.2. Différentes pathologies de béton :

I.2.1. Défauts mécaniques d'ordre structurel :

Les fissures verticales sont liées à un ferrailage insuffisant dans les zones les plus sollicitées :

On rencontre deux types principaux de fissurations d'origine mécanique

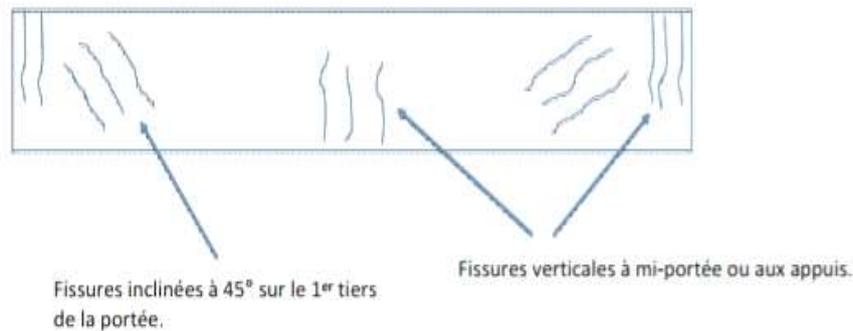


Figure. I.1 : différents types de fissuration [1]

-En partie inférieure à mi-portée, -En partie supérieure («chapeaux») aux appuis. Les fissures à 45° (fissures d'effort tranchant) sont causées par un nombre insuffisant de cadres aux extrémités.

L'origine de ces désordres peut être liée à une erreur de dimensionnement, à un défaut d'exécution (erreur dans le ferrailage, décoffrage prématuré) ou à une utilisation anormale (surcharge d'exploitation).[2]

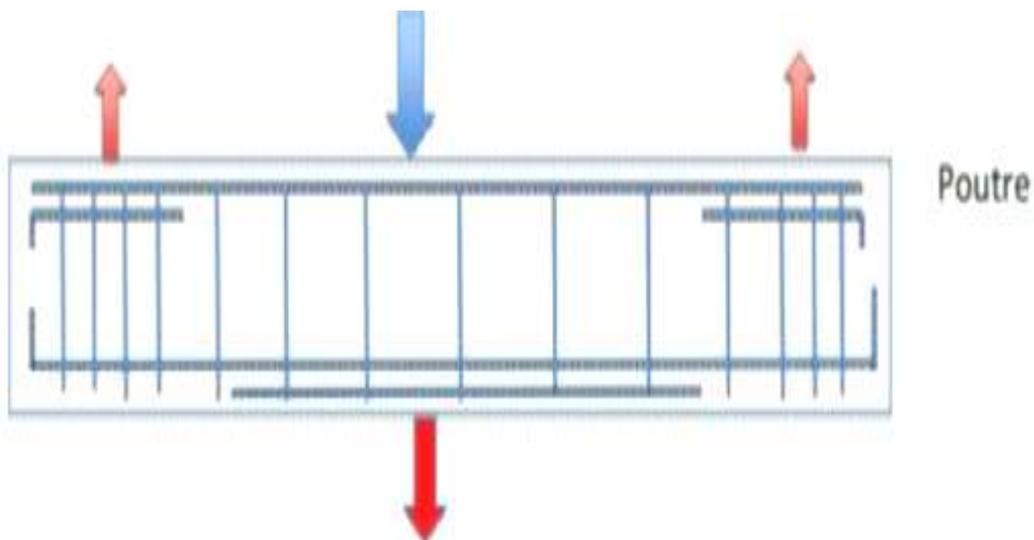


Figure. I.2 : différentes sollicitations provoquant les fissures [1]

CHAPITRE I : Pathologie des structures en béton

I.2.2. Réactions de gonflement interne :

I.2.2.1. Réaction alcali-granulats :

Cette réaction se produit entre les alcalins de la solution interstitielle du béton et le silice ou les silicates de certains granulats. Elle entraîne la formation de gels expansifs qui provoquent des gonflements et une fissuration du béton. Pour que la réaction se produise, trois éléments sont nécessaires :

- La présence en quantité suffisante de granulats réactifs (contenant de la silice amorphe ou incomplètement cristallisés, comme l'opale),
- Une teneur en alcalins (sodium ou potassium) élevée dans la solution interstitielle,
- Une humidité relative ambiante élevée ($> 85\%$).[2]



Figure. I.3 : réaction alcalin granulats [13]

I.2.2.2. Réaction sulfatique interne (RSI) :

Dans le cas d'une élévation importante de température lors du coulage du béton (entre $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ & $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, par exemple dans des pièces massives), l'étringite primaire qui se forme initialement à partir des aluminates ne se forme pas ou se décompose puis, lors du refroidissement, de l'étringite différée se forme. Dans un second temps, en présence d'humidité, cette étringite précipite sous la forme de sels expansifs qui entraînent la fissuration et l'éclatement du béton.

Des recommandations ont été établies pour limiter l'échauffement du béton, et pour contrôler la teneur en sulfates et en aluminates du béton.



Figure. I.4 : réaction sulfatique interne [4]

I.2.3. Dégradations liées à l'environnement :

I.2.3.1. Gel / Dégel –Action des sels :

Les effets constatés sont de deux types: -Eclatements consécutifs au gel à cœur du béton, - Ecaillage du béton par à proximité de la surface.

Ces dégradations sont liées aux déplacements de l'eau dans les porosités du béton. Ce n'est pas l'expansion liée au gel (volume de la glace supérieur de 9 % à celui de l'eau) qui entraîne la fissuration, mais les phénomènes de pression osmotique entre les pores. Le phénomène est comparable en présence de sels de dévers glaçage qui sont surtout à l'origine des écaillages superficiels (phénomène d'haloclastie). Là encore, le fait que les sels soient hygroscopiques (ils augmentent de volume en présence d'eau) n'est pas déterminant dans la survenue des fissurations.

L'importance des désordres est directement imputable à la répétition des cycles gel-dégel ou humidification-séchage. [2]



Figure. I.5 : action des sels [14]

CHAPITRE I : Pathologie des structures en béton

I.2.3.2. Eaux et sols acides :

Les eaux naturelles sont agressives vis-à-vis du béton : le CO₂ dissous qu'elles contiennent peut dissoudre la chaux du béton, puis les autres constituants de la phase liante.

La dissolution de la phase liante entraîne une augmentation de la porosité du béton et on observe un aspect superficiel dégradé avec des coulures blanchâtres et un déchaussement des granulats, puis une décomposition du béton dans la phase ultime du phénomène. Les acides organiques ou minéraux ont un effet identique, mais beaucoup plus intense.[4]

Les sols acides (sols riches en matières organiques : tourbières, marécages) présentent les mêmes risques, surtout s'ils sont fortement humides.

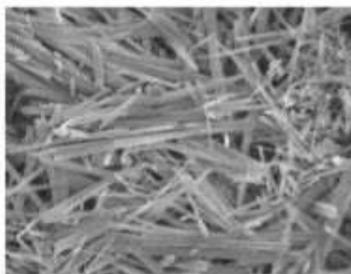
On se prémunit contre ces risques en utilisant des ciments pauvres en chaux. [2]



Figure. I.6 : Eau et sols acide [11]

I.2.3.3. Attaques sulfatiques :

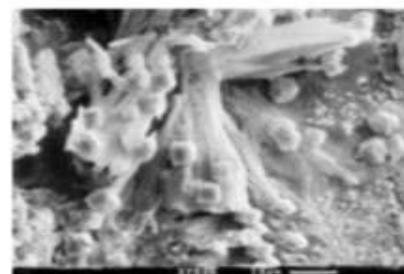
En présence de sulfates, de calcium et d'aluminates (apportés par les C3A du ciment), des sels expansifs (ettringite, thaumasite) précipitent dans les pores du béton et les fortes pressions de cristallisation entraînent la fissuration du béton, voire sa destruction.



Ettringite primaire



Ettringite secondaire expansive



Thaumasite expansive

Figure. I.7 : attaque sulfatique [2]

CHAPITRE I : Pathologie des structures en béton

I.2.3.3. Milieu marin :

a. Facteurs physiques :

Action des vagues (abrasion) et cycles humidification / séchage (absorption et évaporation de l'eau)

b. Facteurs chimiques :

- Formation de sels expansifs : sulfates,
- Dissolution de la phase liante : échanges ioniques $\text{Ca}^{2+} \leftrightarrow \text{Mg}^{2+}$ avec formation de brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$ et de silicates de magnésium hydratés M-S-H sans propriétés liantes.
- Action des chlorures sur les armatures.

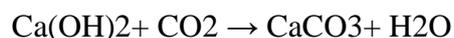
On peut distinguer 3 zones distinctes dans les structures exposées à l'ambiance marine :

- La zone immergée : les altérations sont modérées pour un béton compact (système saturé en eau).
- La zone de marnage : il s'agit généralement de la zone la plus critique, en raison des effets cumulée mécaniques, physiques et chimiques (action mécanique des vagues, cycles humidification-séchage).
- La zone émergée (éclaboussures et embruns) : le risque essentiel d'altération concerne principalement la corrosion des armatures en raison des chlorures.

I.2.4. La corrosion des armatures :

I.2.4.1. Carbonatation :

Dans le béton, l'acier se trouve dans un milieu de pH élevé, en situation de passivation. Toutefois, l'alcalinité du béton est progressivement neutralisée par le CO_2 atmosphérique qui se combine avec la portlandite suivant la relation :



On parle de **Carbonatation** du béton. Ce phénomène entraîne une diminution du PH de la solution interstitielle qui passivait les armatures ; lorsque la zone carbonatée atteint le niveau des aciers, la corrosion peut alors s'amorcer.

CHAPITRE I : Pathologie des structures en béton

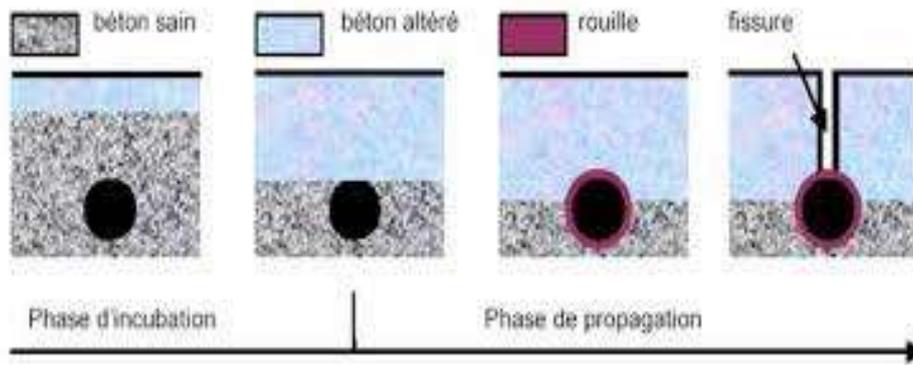


Figure .I.8 : phénomène de carbonatation [2]

I.2.4.2. Action des chlorures :

Les chlorures entraînent la dépassivation de l'acier, même pour un pH élevé. Ils ont donc tendance à favoriser l'initiation de la corrosion.

Le taux de chlorures libres autorisé dans le béton était fixé à 0.65 % / poids de ciment. Il a été ramené à 0.4% voire 0.2% pour le béton précontraint.

Cela correspond à un rapport $[Cl^-] / [OH^-] = 0.6$.

La corrosion initiée par les chlorures présente généralement un caractère localisé. [2]



Figure .I.9 : action des chlorures[15]

I.2.4.3. Fissuration et éclatements :

A côté des phénomènes d'altération du béton armé qui peuvent être aggravés par une mise en œuvre défectueuse (enrobage insuffisant, mauvais choix de liants hydrauliques, de granulats ou d'adjuvants etc.), la pathologie des ouvrages en béton armé se manifeste principalement par la fissuration excessive, la déformation exagérée ou la rupture d'éléments.

CHAPITRE I : Pathologie des structures en béton

La fissuration du béton armé peut avoir deux origines bien distinctes et indépendantes l'une de l'autre:

- La fissuration liée à la mise en œuvre et à la qualité du matériau: fissuration accidentelle
- Les fissurations liées au fonctionnement de l'ouvrage : fissuration fonctionnelle mécanique ou thermique.

Avant d'envisager le traitement des fissures, il est impératif d'en déterminer l'origine. Les fissures ne sont en effet que la manifestation de phénomènes dont il faut mesurer la gravité.[1]

I.2.4.3.1. Fissuration accidentelle :

Les principales causes de fissurations accidentelles (précoce ou plus tardive) sont en nombre de cinq:

- a) **Le ressuage:** l'exsudation superficielle d'une partie de l'eau de gâchage à la surface du béton frais s'accompagne d'un tassement qui peut créer des fissures au droit des obstacles s'opposant au mouvement, tel que les armatures et les variations d'épaisseur notamment.

L'ouverture de ces fissures peut atteindre plusieurs millimètres et entraîner la corrosion des armatures.

- b) **Le retrait plastique:**

Il s'agit d'un phénomène exogène de dessiccation qui se produit avant et pendant la prise du béton. L'ordre de grandeur du retrait plastique est de 1 à 5 mm par mètre selon la vitesse d'évaporation de l'eau du béton. La fissuration plastique affecte les bétons de qualité médiocre.

- c) **Le retrait thermique:**

"Après prise" La prise du ciment étant une réaction exothermique; elle s'accompagne d'un important dégagement de chaleur (plusieurs de dizaines de degrés) qui échauffe le béton. Après la prise, le refroidissement du béton se traduit donc par un retrait thermique qui peut provoquer l'apparition de fissures.

CHAPITRE I : Pathologie des structures en béton

d) Le retrait hydraulique:

Ce retrait différé s'exerce sur une période de 1 à 2 ans après la mise en œuvre. Il est directement lié au départ de l'eau libre du béton (excédant d'eau de gâchage nécessaire à l'ouvrabilité du béton mais n'entrant pas dans sa constitution) dans le temps. Ce retrait se produit d'autant plus lentement que les pièces sont massives et que l'humidité ambiante est élevée.

Les fissures liées aux quatre premières causes apparaissent entre les premières heures et les premiers mois d'existence du béton. Les fissures accidentelles n'ont en elles-mêmes aucun caractère de gravité. Elles peuvent cependant avoir des conséquences néfastes sur les ouvrages eux-mêmes ou les éléments qui leur sont associés:

- Corrosion des armatures si leur ouverture est importante
- Infiltrations d'eau, notamment si elles sont traversantes
- Désordres causés à des revêtements rapportés [18]

I.2.4.3.2. Fissuration fonctionnelle mécanique :

Le principe même du fonctionnement des ouvrages en béton armé est basé sur la médiocre résistance du béton en traction. Celle-ci est compensée par les armatures placées dans les zones tendues. La sollicitation des armatures en traction suppose donc la fissuration du béton.

Lorsque les fissurations sont conformes au schéma de calcul, il n'y a pas de danger ni de désordre. Les fissures fonctionnelles d'un ouvrage en béton correctement dimensionné et mis en œuvre sont par nature compatibles avec un bon comportement. La seule anomalie peut donc provenir d'une ouverture excessive des fissures qui indique obligatoirement le dépassement des sollicitations prises en compte.

Lorsque la fissuration n'est pas conforme au schéma de calcul, on peut conclure à priori à une conception, une mise en œuvre ou un usage défectueux. Cela concerne généralement un mauvais positionnement des armatures, une sollicitation excessive du béton en compression, des dispositions constructives inadéquates ou des sollicitations non prises en compte dans les hypothèses de calcul (surcharges exagérées, tassement de fondations, poussées et tractions au niveau d'éléments structurels).

CHAPITRE I : Pathologie des structures en béton

Il est également possible que la modélisation choisie pour le calcul des ouvrages ne soit pas représentative du fonctionnement réel. Cela se produit notamment lorsque des reports de charges intéressent des éléments de raideurs très différentes. Les éléments les plus raides plus reprennent alors des charges pouvant être beaucoup plus importantes que prévu.

I.2.4.3.3. Fissuration fonctionnelle thermique :

La plupart des ouvrages en béton armé sont soumis à des variations de température qui se traduisent par des dilatations et des rétractions. Lorsque ces mouvements sont gênés ou empêchés par des éléments de structure raides, ou lorsque les joints de dilatation sont trop espacés, les raccourcissements s'effectuent au prix de fissures. La rouille (oxyde de fer hydraté) présente un caractère expansif qui entraîne l'éclatement du béton.



Figure. I.10 : fissuration de béton et éclatement [4]

CHAPITRE II

Technique de réparation et de renforcement

CHAPITRE II : Technique de réparation et renforcement

II.1. Introduction :

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, des matériaux utilisés, de sa réalisation ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance. Le béton résiste au temps qu'il fait et au temps qui passe. Mais les ouvrages en béton peuvent nécessiter des opérations de réparation ou de renforcement pour augmenter leur durée d'utilisation ou offrir de nouvelles fonctionnalités.

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

Le choix d'une ou des méthodes de réparation et de renforcement est défini en relation étroite avec la nature et le degré d'importance des désordres constatés lors d'un diagnostic.

Ce choix est tributaire de matériaux de construction utilisés, des techniques choisies, et de Critères économiques.

On peut être amené donc à procéder :

* A des remises en état d'éléments structurels présentant des défauts que l'on cherche à atténuer, pour obtenir un aspect satisfaisant tels que: l'obturation de fissures qui sont dues le plus souvent au retrait et aux variations environnementales.

* Au renforcement ou à la réparation d'éléments insuffisamment résistants, les réparations sont souvent réalisées dans les zones ou les sections sont trop sollicitées et défailtantes, par contre le renforcement des éléments consiste à améliorer leurs caractéristiques mécaniques de manière à ce qu'elles offrent une meilleure solidité aussi bien en état de service qu'en état de résistance ultime.[1]

CHAPITRE II : Technique de réparation et renforcement

II.2. Renforcement par une précontrainte additionnelle :

Il peut être envisagé d'appliquer à des ouvrages existants des efforts de précontrainte en vue soit de leur redonner leur état de service initial, soit de leur donner un nouvel état de service. Cette technique présente l'avantage d'éviter les efforts concentrés importants sur la structure, elle est bien adaptée aux structures minces et peu ferrillées.

Le câble additionnel étant le plus souvent situés à l'extérieur du béton, il peut y avoir un risque d'instabilité d'ensemble : le flambement. On prévient ce risque en prévoyant aussi des fixations transversales qui s'opposent à une mise en vibration de ces derniers.

La conception et le calcul doivent être en conformité avec les règlements en vigueur.

L'étude doit porter sur l'influence de l'effet des efforts appliqués localement sur des structures ou éléments structurels non conçus à l'origine pour les recevoir. Les tracées des armatures de précontrainte additionnelle peuvent être rectilignes ou polygonaux:

Le tracé rectiligne simple et facile à mettre en œuvre, améliore peu la résistance au cisaillement

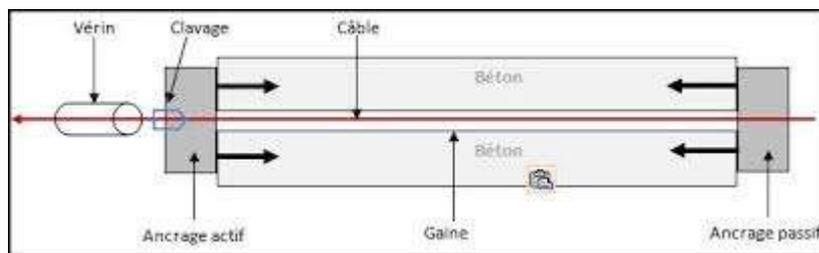


Figure II.1 : Un tracé rectiligne d'une précontrainte [7]

Le tracé polygonal est plus efficace que le tracé précédent, mais il exige la construction de déviateurs qui ont l'inconvénient d'augmenter les pertes par frottement lors de la mise en tension des câbles

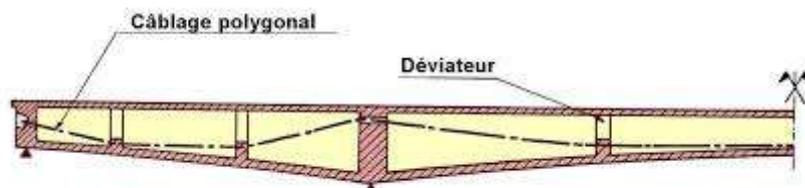


Figure II.2 : Tracé polygonal d'une précontrainte.[8]

CHAPITRE II : Technique de réparation et renforcement

II.3. Renforcement par gainage métallique :

Les efforts complémentaires appliqués à la structure sont introduits en deux points, aux extrémités de l'armature (cas de tracé rectiligne), et de même pour le deuxième tracé ils sont introduits aussi en certains points de leur courbure ou se trouvent les déviateurs.

Il se peut qu'une précontrainte éventuelle complémentaire soit disposée à l'intérieur du béton dans des gaines prévues à cet effet lors de la conception de l'ouvrage (cas assez rare), soit extérieurement du béton dans l'âme en cas de poutres pleines.

Ce type de renforcement est utilisé généralement pour les poteaux ; l'union de la platine à la structure peut se faire par : Collage, vissage, ou bien ancrage. Du point de vue transmission des efforts, la meilleure technique est celle du collage.[1]

II.4. Projection du béton :

Cette technique est largement répandue, tant sur le plan de renforcement des structures ou éléments structurels insuffisants, que sur un plan de réparation des structures ou éléments structurels défaillants, exigeant une mise en œuvre soignée. Le béton projeté peut éventuellement être associé avec un autre mode de réparation, qui est le rajout d'armatures d'acier. Cette méthode de projection de béton peut être réalisée, soit par voie sèche ou bien par voie humide. Le procédé par voie sèche est particulièrement recommandé pour la réparation des ouvrages car cette voie permet de recueillir un béton très compact. Cette projection est effectuée à grande vitesse de lancement, assurant ainsi :

- une pénétration en grande profondeur dans les pores du support à renforcer.
- une bonne adhérence de l'interface.

Si les dégradations sont profondes, on procède au préalable à un repiquage ou une démolition des surfaces de béton, sinon on fait appel au procédé de sablage pour le cas des dégradations superficielles.

La qualité des matériaux d'adjonction ou de rajouts, doit être au moins égale à celles des matériaux d'origine des ouvrages. Dans la mesure du possible, la lance de projection doit être tenue perpendiculairement à la surface à traiter, et à une distance moyenne de 1.2m.

CHAPITRE II : Technique de réparation et renforcement

En faisant un nombre de passes aussi faible que possible, il faut chercher à réaliser un enrobage régulier, et obtenir ainsi une couche compacte. La projection verticale vers le bas n'est pas recommandée, ainsi qu'un talochage n'est pas souhaité.



Figure II.3 : Renforcement au moyen de béton projeté [1]

II.4.1. Description des deux méthodes

A. Projection par voie sèche

La vitesse des éléments du mélange à la sortie de la lance est de l'ordre de 100m/s. elle décroît plus rapidement pour les éléments de faible masse (eau- fines -ciment) que pour les gros granulats. Il se forme alors sur la surface d'application une fine couche de pâte formée par l'eau et le ciment, qui retient instantanément les granulats fins, mais sur laquelle les gros granulats commencent par rebondir, au fur et à mesure de son épaissement, cette couche est « martelée » par les gros granulats qu'elle finit par retenir,

- un serrage énergétique dû à la grande vitesse de projection.
- une bonne adhérence due à la richesse en ciment dans la zone au contact de la surface d'application.

Du fait de l'enrichissement en ciment au voisinage de la surface, le dosage initial en ciment peut être limité. Toutefois les normes préconisent un dosage pas moins de 280 kg/m³ de ciment ayant une résistance à la compression supérieure à 25 MPa.

CHAPITRE II : Technique de réparation et renforcement

B. Projection par voie mouillée :

La vitesse de transport et de projection est inférieure à 1m/s, nettement plus faible que dans le cas d'une projection à voie sèche. Le mélange ayant sa composition définitive au passage de la lance, il n'y a pas de surdosage dans la zone de contact avec la surface d'application.

Pour obtenir des performances mécaniques équivalentes à celles d'un béton projeté par voie sèche, il est nécessaire d'augmenter le dosage en ciment. L'emploi d'adjuvants permet d'obtenir la maniabilité désirée, avec un dosage en eau aussi faible que possible, une telle consistance du béton exigera un affaissement au cône correspondant, de l'ordre de 12 cm

II.4.2. Avantages des deux méthodes :

a) Par voie sèche :

- Possibilité d'utiliser des granulats de grande dimension (15 à 20 mm)
- Un dosage relativement faible en ciment.
- Un faible rapport E/C.

b) Par voie mouillée :

- Composition uniforme de la couche projetée
- Pas de rebondissement violent.
- Pas de production de poussières.

II.4.3. Inconvénients des deux méthodes

a) Par voie sèche :

- Pertes de volume du béton projeté importantes par rebondissement.
- Production de poussières.

b) Par voie mouillée :

- Dosage en eau et en ciment plus élevé pour assurer une plasticité nécessaire.
- Compactage faible.
- Nécessité d'accélérateurs de prise.

II.5. Le renforcement au moyen de profilés métalliques :

L'association des profilés métalliques aux structures en béton armé permet d'augmenter la capacité portante de la structure. La réalisation ainsi d'une structure mixte acier-béton dont il faut assurer la compatibilité entre ces deux matériaux est indispensable et nécessaire. Cette

CHAPITRE II : Technique de réparation et renforcement

compatibilité entre les deux matériaux est liée directement à la qualité de l'interface (acier-béton) pour bien transmettre les efforts internes.

L'intérêt de cette méthode est la rapidité de réalisation in-situ, les pièces métalliques sont préfabriquées en atelier, et leur montage s'effectue à l'aide de chevilles ou tiges ancrées. L'assemblage sur site des éléments décomposés en tronçons facilite ainsi leur transport et mise en place.

L'inconvénient majeur de cette méthode de renforcement tient à la précision qui est requise lors du mesurage de la structure existante, si les éléments fournis se positionnent correctement au montage. Il est recommandé d'envisager des possibilités d'ajustement et de positionnement des pièces métalliques pré-forées vis-à-vis de forages dans le béton, lors du montage, contrairement aux constructions métalliques nouvelles.



Figure II.4: Renforcement de poteaux au moyen de profilés métallique.

II.6. Adjonction de matériaux composites (Polymères Renforcés en Fibres) :

Un matériau composite est l'assemblage de deux matériaux de nature différente, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Les matériaux composites sont composés de fibres noyées dans une matrice. Une fibre est constituée de plusieurs filaments, élémentaires dont le diamètre est de l'ordre de $5\mu\text{m}$. La fibre a un comportement élastique linéaire jusqu'à rupture les lois de comportement sont de type "élastique fragile". Le comportement mécanique des matériaux composite dépend du type de fibres et du type des matrices, qui doivent être compatibles entre eux.[3]



Figure II.5 : confinements d'un poteau au moyen de PRF [1]

La matrice est le matériau qui donne le monolithisme à l'ensemble, et permet d'assurer le collage des fibres entre elles et transférer les efforts extérieurs à celles-ci. De plus la matrice joue un rôle très important pour résister aux efforts tranchants par ailleurs elle protège les fibres en les isolant de l'humidité de l'oxydation et des agents agressifs chimiques.

II.6.1. Les fibre de carbone :

II.6.1.1. Elaboration des fibres de carbone

Les fibres de carbone sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé "précurseur", se présentant lui mêmes sous forme de fibres orientées. Actuellement, les fibres utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir du poly-acrylonitrile (PAN), La qualité finale des fibres de carbone dépend des qualités du précurseur.[5]

Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique, sans fusion des fibres, aboutissant à une graphitisation dans laquelle on retrouve la structure initiale des fibres. Les procédés actuels utilisent des mèches de filaments acryliques assemblés sans torsion (de 1000, 6000 jusqu'à 10000 filaments), et leur font subir quatre traitements successifs : une oxydation, une carbonisation, une graphitisation et un traitement de surface [17]

CHAPITRE II : Technique de réparation et renforcement

II.6.1.2. Les caractéristiques mécaniques des fibres de carbone:

Les fibres de carbone possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques, d'autant plus que leur masse volumique est faible. En outre, il faut noter que les fibres de carbone ont une excellente tenue à haute température. En effet leurs caractéristiques mécaniques sont maintenues jusqu'à 1500°C environ. Cette propriété a conduit à développer des composites : fibres de carbone/matrice de carbone, à haute tenue thermique, utilisés dans les tuyères de fusées, les éléments de fours, etc. Ces matériaux revêtus d'une couche protectrice anti-oxydante, trouvent également des applications en atmosphère oxydante dans le domaine spatial.[7]

II.6.2. Fibres de verre :

Elles sont obtenues à partir de silice et d'additifs. Le verre est coulé en fusion à 1250°C à travers une filière en platine-rhodium ; après refroidissement, les filaments sont étirés pour obtenir des fibres continues. Suivant les applications aux quelles elles sont destinées, les fibres de verre sont réparties en trois qualités :

Fibre E pour les composites grandes diffusions (GD).

Fibre D pour les applications dans la construction électrique (circuits imprimés)

Fibre R pour les composites hautes performances (HP)

L'utilisation de fibre de verre dans le composites est principalement limitée par vieillissement accélérée au contact prolongé de l'eau, des rayonnements UV ou de T° élevées.[5]

II.6.3. Fibres d'aramides:

II.6.3.1. Elaboration des fibres d'aramides:

Les fibres aramides à caractéristiques mécaniques élevées sont généralement connues sous le nom de "Kevlar", nom commercial de la fibre mise au point par Dupont de Nemours. L'élaboration des fibres d'aramide est effectuée à basse température (-10°C), puis par filage en solution. Les fibres sont ensuite étirées et traitées thermiquement afin d'augmenter leur module d'élasticité.[4]

II.6.4. Polymères renforcés de fibre (PRF) :

Les matériaux composites en polymères renforcés de fibres sont des produits de synthèse constitué principalement de renforts fibreux, supportés par un liant appelé matrice leur comportement dépend principalement des constituants.

CHAPITRE II : Technique de réparation et renforcement

Ce sont les renforts fibreux qui donnent au composites leurs propriétés hautement directionnelles, leurs imposant un comportement anisotrope et essentiellement linéaire élastique jusqu'à la rupture.

Tableau II.1 : Comparaison qualitative entre les fibres

Critères	Fibre de carbone	Fibre d'aramide	Fibre de verre
Résistance à la traction	Très bonne	Très bonne	Très bonne
Résistance à la compression	Très bonne	Inadéquate	Bonne
Module d'élasticité	Très bonne	Bonne	Adéquat
Comportement à long terme	Très bonne	Bonne	Adéquat
Comportement à la fatigue	Excellent	Bonne	Adéquat
Densité	Bonne	Excellent	Adéquat
Résistance alcaline	Très bonne		Inadéquate
Prix	Adéquat	Adéquat	Très bonne

II.6.4.1. Intérêt des polymères renforcés de fibres (PRF) dans le bâtiment et les travaux public :

Intérêt de l'utilisation des polymères renforcés de fibres dans le génie civil se trouve essentiellement dans (Luyckx 1999)

- Sa faible densité ;
- Ses propriétés mécaniques longitudinales ;
- L'absence de corrosion ;
- Sa très bonne tenue à la fatigue ;
- Sa facilité de manipulation.

II.6.4.2. Principaux inconvénients des (PRF) :

- Une anisotropie très marqué ;
- Un comportement à la rupture de type fragile des composites ;
- Un prix de matière élevé comparé a celui de l'acier.[8]

CHAPITRE II : Technique de réparation et renforcement

II.6.4.3. Technique de renforcement :

Bien que l'installation du système de renforcement avec des matériaux composites varie d'un fabricant ou d'un installateur à l'autre, le processus passe généralement par les étapes suivantes (carolin 2003) :

- 1- Inspecter la surface de l'élément de structure à renforcer ;
- 2- Réparer les fissures et les surfaces effritées avec une injection d'époxy et de mortier à base de résine époxy ;
- 3- Préparer la surface de l'élément de structure en éliminant les saillies et en s'assurant que le profil est adéquat.
- 4- Appliquer une couche d'apprêt puis du mastic de vitrier afin d'assurer l'adhérence des tissus de fibre.
- 5- Appliquer une première couche de colle sika-dur-330.
- 6- Appliquer les tissus de fibres sur la surface, comme s'il s'agit de papier peint.
- 7- Appliquer une deuxième couche d'une colle sika dur 330, une fois que les tissus auront bien durci, généralement au bout d'une heure.
- 8- Répéter les étapes 6 et 7, jusqu'à ce que toutes les couches de fibres soient installées.[6]

II.6.4.4. Les avantages du renfort au moyen de matériaux composites :

- Une légèreté 5 fois plus que l'acier.
- Une résistance 10 fois plus optimale que les platines.
- Une grande flexibilité avec une faible épaisseur.
- Une facilité de transport.
- Un poids de l'ordre de 800gr le mètre carré (épaisseur d'environ 1 mm).
- Non sensibilité à la corrosion et d'autres attaques chimiques.
- Une mise en œuvre aisée.
- Adaptation aux supports.[4]

CHAPITRE II : Technique de réparation et renforcement

II.6.4.5. Quelques applications des matériaux composites (PRF) en génie civile :

Le génie civil est actuellement peu consommateur de matériaux composites comparativement à d'autres secteurs tels que l'industrie de l'automobile ou celle de l'aérospatiale. Cependant, il existe de réelles perspectives dans les prochaines années quant à leur utilisation structurelle pour la réhabilitation de la construction civile et industrielle, d'où l'intérêt est longuement apporté par les différents aspects d'éléments structuraux en béton renforcés ou réparés par des (PRF).

D'une manière générale, les matériaux composites du type (PRF) présentent des avantages considérables dès qu'il s'agit de la protection, la réparation et le renforcement d'ouvrages ou d'éléments en béton armé tels que poutre, poteau, dalle ou mur.[10]

A. Les poutres

Le renforcement vis-à-vis la résistance à la flexion d'une poutre en béton armé simplement appuyée en utilisant les composites (PRF) est généralement réalisé par collage externe des lamelles (PRF) sur le support de la poutre concernée; Avant l'application de la lamelle (PRF) le support doit être préparé. Le but de la préparation d'une surface adéquate est d'enlever la couche faible de la surface du béton et d'exposer la totalité du béton pour améliorer la liaison avec le (PRF), et de fournir une surface uniforme (Steiner 1996, et Teng et al 2002)



Figure II.6: Une poutre en béton armé renforcée par une lamelle en PRF (Smith et Teng 2002) [9]

Les plaques (PRF) peuvent être préfabriquées, dans ce cas, quelques préparations de surface de liaison de cette dernière peuvent être nécessaires. D'autre part, la plaque (PRF) peut être constituée sur place par un procédé de stratification directe. Il y a plusieurs variations de la procédure de base.

CHAPITRE II : Technique de réparation et renforcement

Ceux-ci incluent la précontrainte de la plaque, et la prévision d'ancrage tel que les bandes en U aux fins de la plaque pour réduire le risque des ruptures par décollement

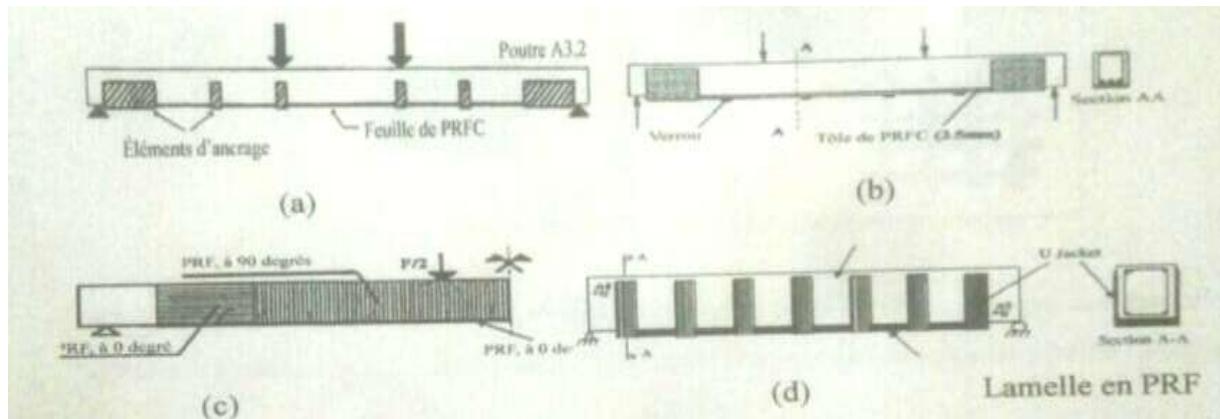


Figure II.7 : quatre types d'ancrage utilisés : (a), (b), (c), (d) [11]

- (a) encrage avec des chemises en U et des bondes en acier (Spadea Etc al. 1998) ;
- (b) ancrage avec des chemises en U et des verrous en acier (Mukhopzdhayaya et al. 1998)
- (c) ancrage avec des tissus de (PRF) enroulés autour des trois cotés (Arduini et Nanni 1997)
- (d) ancrage par des chemises de (PRF) en forme de U (Teng et al. 2003)

B. les dalles :

La procédure de base de renforcement des dalles simplement appuyées par (PRF) est de coller des bondes ou des lamelles (PRF) sur la face tendue de la dalle. Pour les dalles travaillants dans les deux sens on utilise des lamelles croisées ou bien des (PRF) avec des fibres dans les deux directions. D'autres part, le renforcement d'une dalle en béton armé travaillant dans les deux sens peut être concentré » dans la région centrale ou dans la région des moments maximaux selon les besoins de renforcement mais dans les cas bondes/lamelles de (PRF) sont terminées loin de la dalle.

CHAPITRE II : Technique de réparation et renforcement



Figure II.8 : renforcement des dalles par les PRF

C. les colonnes :

Plusieurs techniques différentes ont été développées pour renforcer ou réhabiliter des colonnes existantes en béton armé en utilisant des composites (PRF). Les méthodes de renforcement peuvent être classées en trois catégories en fonction de la méthode adoptée pour construire le composite (PRF) à savoir : la stratification au contact, l'enroulement filamentaire et le chemisage par coquille préfabriquée en (PRF). Une colonne peut être enveloppée complètement par des tissus (PRF) avec une ou plusieurs couches. Elle peut être aussi partiellement enveloppée en utilisant des bandes (PRF) sous formes d'une spirale continue ou des anneaux discrets.

Dans le cas des colonnes en béton armé renforcée avec des matériaux composites, les (PRF) développent une résistance à la déformation due aux charges axiales, qui résulte d'un confinement de contrainte de compression ultime du béton (Mander et al. 1998). (Shahaxy et al. 2000, Volety 2006) on peut facilement observer que le confinement des colonnes avec des composites (PRF) a nettement augmenté la capacité des colonnes renforcées.

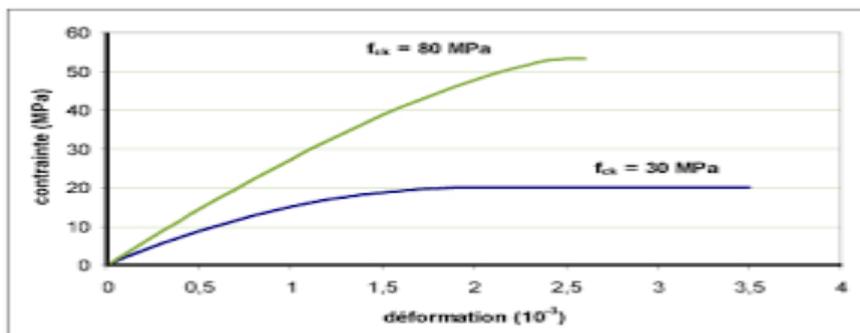


Figure II.9 : courbe comparatives de béton normal et béton confiné selon la norme NF EN 1992 -1.3 [23]

CHAPITRE II : Technique de réparation et renforcement

D. assemblage poteau-poutre :

Les études sur le renforcement de l'assemblage poutre-poteau à l'aide de tissu (PRF) sont très rares. Tout récemment, (pantelidis et al. 2000) ont communiqué les résultats d'une étude expérimentale qu'ils ont effectuée à université d'Utah, Salt Lake City.

Des charges cycliques inversées ont été appliquées à deux spécimens de demi-grandeur, représentatifs des constructions des années 60, c'est-à-dire avec une résistance insuffisante. Des essais ont été effectués sur un spécimen non modifié et un spécimen renforcé avec un des composites de (PRF) afin d'évaluer l'efficacité de polymère sur le plant du renforcement de la résistance au cisaillement. Il n'y a pas de renforcement transversal à la base de l'assemblage, et les barres longitudinales des la poutre ne sont pas proprement ancrés à la connexion.

Durant l'essai de chargement, le poteau était soumis à une charge longitudinale visant à simuler la charge produit par la gravité, tandis qu'une charge cyclique inversée était appliquée à l'extrémité libre de la poutre. Le deuxième spécimen a été renforcé à l'aide de tissus de (PRF) afin d'améliorer la résistance au cisaillement et la ductilité de l'assemblage.



Figure II.10 : assemblage poteaux-poutres

6.4.6. Caractéristique des produits de renforcement :

CHAPITRE II : Technique de réparation et renforcement

Les produits de renforcement utilisés doivent posséder vis-à-vis d'un béton dégradé les qualités suivantes :

a) Présenter une compatibilité avec le support béton à savoir:

- Un retrait limité pour des liants hydrauliques employés, ce phénomène qui apparaît dès la prise et au durcissement final, et de manière à éviter l'apparition de fissures ou un décollement de l'interface.
- Une adhérence au béton support et une résistance au moins égale à la résistance du béton renforcé.
- Une adhérence aux armatures métalliques initiales ou rajoutées.
- Des résistances mécaniques à la compression, à la traction, similaire ou supérieures à celles du béton de support.
- Un coefficient de dilatation le plus proche possible de celui du béton support.

b) présenter une durabilité par rapport aux conditions environnementales:

- les principaux agents agressifs participant au phénomène de corrosion des armatures à prendre en compte pour l'environnement sont :
 - les chlorures
 - les sulfates
 - le gaz carbonique
 - l'oxygène. [9]

CHAPITRE III

Caractérisation des matériaux

CHAPITRE III : caractérisation des matériaux

III.1.Introduction :

Le programme expérimental considéré dans cette étude est composé de deux parties complémentaires ; la première partie est consacrée à la caractérisation des matériaux utilisés dans cette étude et la formulation de béton de classe 32.5MPa selon la méthode de **Dreux Gorisse** [22]. À cet effet des essais de flexion sont réalisés sur des éprouvettes (15*15*60) selon la norme NF EN ISO 178 ASTM D790 pour déterminer la résistance de notre béton. La seconde partie est consacrée en premier lieu aux résultats des essais de flexion des poutres témoins et les poutres renforcées pour une comparaison entre eux de point de vue amélioration de résistance donc la durabilité de notre matériau.

III.2. objectif de travail :

Ce travail de recherche est une contribution aux travaux réalisés sur la réparation et le renforcement des structures en béton. L'objectif principal de ce travail est l'étude expérimentale du comportement des poutres en béton sous un chargement de flexion jusqu'à la rupture.

Le protocole expérimental, contient les caractéristiques des matériaux élaborés, les notions et les procédés de construction de toutes les éprouvettes.

Les résultats obtenus sont présentés et discutés.

III.3. Caractéristiques des matériaux utilisés :

Pour utiliser un matériau dans une étude il faut d'abord connaître leur caractéristiques (physique, chimique, ...etc.) puisque chacune de ces caractéristiques peuvent influencer sur les résultats, c'est pour cette raison qu'on a procédé à la caractérisation de chaque constituants qui va être utilisé dans cette étude.

III.3.1. Ciment :

Dans cette étude on a utilisé un seul type de ciment portland **CEM2** classe 32.5, nommé commercialement (CHAMIL) provenant de la cimenterie de LAFARGE (M'SILA).

Sa composition chimique, minéralogique et caractéristiques mécaniques sont représentées dans les tableaux suivant : [16]

CHAPITRE III : caractérisation des matériaux

Tableau III.1 : caractéristiques physiques de ciment

Consistance normal	0.26
Début de prise à 20°C (NA230) (min)	120-180
Fin de prise (min)	200-230
SSB (NA231) (cm ² /g)	4400-5400
Poids spécifique (g /cm ³)	3.11
Retrait à 28J	Inférieur à 1000
Expansion	0.5-2.5

Tableau III. 2 : caractéristiques chimiques de ciment

constituants	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O ₃	MgO	Cl	K ₂ O	PAF
Teneur	62.10	18.00	4.00	2.1	3.1	0.15	1.7	0.05	0.64	10

Tableau III. 3 : caractéristiques minéralogiques de ciment

Composants	C ₃ S	C ₃ A	C ₂ S	C ₄ AF
Teneure (%)	60-63	7.5-8.5	15-30	5-10

III.3.2. Les granulats :

Le gravier : Les graviers utilisés dans cette étude c'est le gravier 3/8 et 8/15 provient de carrière EL-HACHIMIYA wilaya de BOUIRA.

Le sable : le sable utilisé est le sable concassé (0/3) d'EL-HACHIMIYA.

Les propriétés physico-chimiques des granulats sont représentées dans les tableaux suivant :

CHAPITRE III : caractérisation des matériaux

Tableau III. 4 : caractéristiques physico-chimique de gravier

Caractéristique	8/15	3/8
Mv absolue (g/cm ³)	2.64	2.67
Mv apparente (g/cm ³)	1.47	1.48
Los angles	24.4	/
Absorption	0.60	0.60
Porosité	1.58	1.58

Tableau III. 5 : Les propriétés physico-chimiques de sable

Mv apparente (g/cm ³)	1.69
Mv absolue (g/cm ³)	2.67
Absorption (%)	0.60
Equivalent de Sable (%)	79.23

L'analyse granulométrique des granulats est présentée sur les tableaux suivants

Tableau III.6 : analyse granulométrique de Sable (0/3)

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus Cumulés (g)	Pourcentage refus Cumulés (%)	Pourcentage tamis Cumulés (%)
5	8	0,8	99,20
2,5	300	30,0	70,00
1,25	632	63,2	36,80
0,63	821	82,1	17,90
0,315	888	88,8	11,20
0,16	926	92,6	07,40
0,063	949	94,9	05,10

$M_f = \text{refus de tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5 / 100 = 3,5$

Donc le sable 0/3 est un sable grossier .

CHAPITRE III : caractérisation des matériaux

Tableau III.7 : analyse granulométrique de gravier (3/8)

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus Cumulés (g)	Pourcentage refus Cumulés (%)	Pourcentage tamisas Cumulés (%)
10	10	0,63	99,37
8	100	6,25	93,75
6,3	368	23,00	77,00
5	662	41,37	58,63
2,5	1469	91,81	08,19
1,25	1530	95,62	04,38
0,63	1540	96,25	04,21

Tableau III.8 : analyse granulométrique de gravier (8/15)

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus Cumulés (g)	Pourcentage refus Cumulés (%)	Pourcentage tamisas Cumulés (%)
12,5	478	15,93	84,06
10	1175	39,16	60,84
8	2259	75,30	24,70
6,3	2693	89,76	10,24
5	2831	94,36	05,63
2,5	2918	97,26	02,73

CHAPITRE III : caractérisation des matériaux

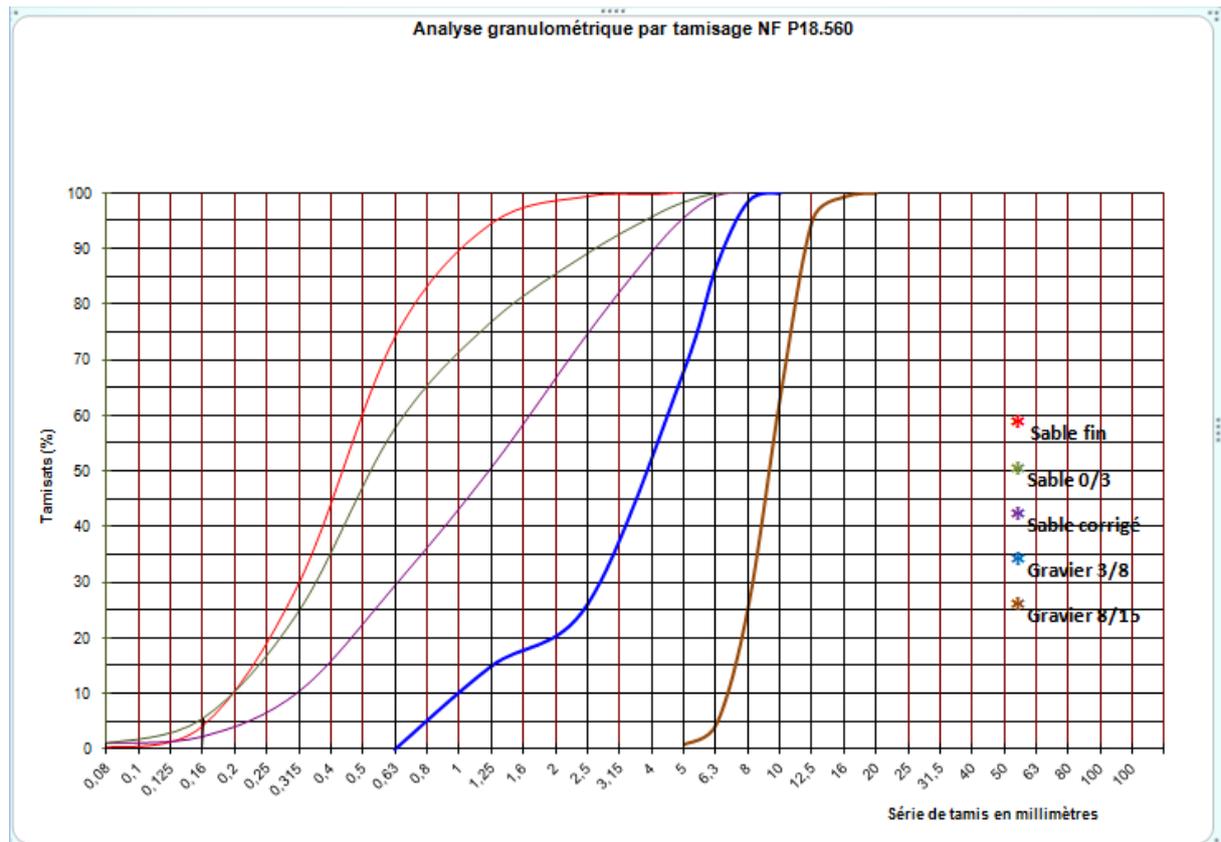


Figure III.1 : courbes d'analyse granulométrique des granulats

III.3.3. Eau de gâchage :

L'eau destinée au gâchage du béton doit être propre et ne doit pas contenir d'impuretés qui pourraient nuire à la qualité du béton (matières organiques ou chimiques...).

L'eau permet au ciment de faire prise (c'est un des réactifs de la réaction d'hydratation), et de donner au béton une consistance (ouvrabilité) adaptée à l'ouvrage à réaliser. L'eau est un constituant très important du béton, car elle peut en influencer la qualité, en fonction de sa qualité et de sa quantité.

CHAPITRE III : caractérisation des matériaux

III.4. Composition de béton :

Les dosages pondéraux des constituants de notre béton dans 1m^3 calculés par la méthode de Dreux-Gorisse et les résultats de calcul sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.9 : composition de béton

Constituants	Ciment	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)	Eau	E/C
Dosage (kg/m^3)	350	693	107	1149	160	0,45

III.4.1. Propriétés de béton :

Tableau III.10 : propriétés de béton

Affaissement (cm)	Resistance à la compression à 28J (MPa)
12	32

III.5. Matériaux de réparation :

III.5.1. Les fibres de carbone :

Sont particulièrement fines de l'ordre de 5 à 10 micromètres de diamètre et composées presque exclusivement d'atomes de carbone plus quelques pourcents d'atomes d'azote d'oxygène et d'hydrogène. Elles servent notamment à renforcer certains matériaux composites.

Dans notre travail on a utilisé **Le Sika-Wrap-230 C/45** commercialisé en Algérie par **Sika El-djazair** dont un tissu unidirectionnel de renforcement de structures, à base de fibre de carbone appliqué à l'aide d'une résine de collage.

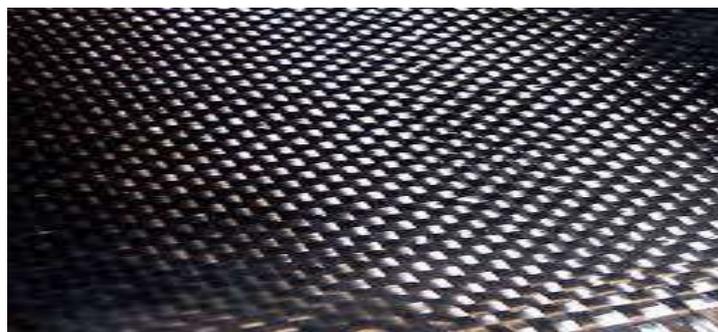


Figure III.2 : tissu de fibre de carbone (Sika-Wrap)

CHAPITRE III : caractérisation des matériaux

Les caractéristiques mécaniques de fibre de carbone sont présentées sur le tableau suivant :

Tableau III.11 : caractéristique mécaniques de fibre de carbone [9]

Resistance a la traction (MPa)	Charge ultime MPa	Epaisseur mm	Élongation %	Module E (GPa)
184	180.75	1.25	0.66	25.45

III.5.2. Les tissus de fibre de verre :

Les fibres de verre sont moins chères et présentent une plus faible résistance mécanique mais une plus grande déformabilité, ce qui les rend la solution la plus utilisée dans plusieurs applications, telle que le génie civil, l'industrie des bateaux et d'automobiles. Par contre Les plus grands inconvénients des fibres de verre sont les problèmes de relaxation (sensibilités à l'humidité) et leur dégradation par des phases alcalines, mais avec le choix correct de matrice les fibres sont protégées.

Dans notre travail nous avons utilisé un tissu constitué de fibres de verre continues type E d'une épaisseur de 0.25 mm (ISO 4603) et d'un poids spécifique de 300 g/m².



Figure III.3 : Tissus en fibre de verre

Les caractéristiques mécaniques de fibre de verre sont présentées sur le tableau suivant :

Tableau III.12 : caractéristique mécaniques de fibre de verre [9]

Resistance a la traction (MPa)	Charge ultime MPa	Epaisseur Mm	Élongation %	Module E (GPa)
108.94	124.5	1.64	2.66	5.85

CHAPITRE III : caractérisation des matériaux

III.5.3. La résine :

Sika-dur-330 est une résine d'imprégnation époxydique, thixotrope, à 2 composants, mélange de résine époxydique et de fillers spéciaux. Sikadur-330 est conforme aux exigences de la norme NF EN 1504-4 en tant que produit de collage structural. Sert de résine d'imprégnation avec les systèmes de renforcement structurels Sika-warp Hex-230 et Sika-warp -430G.[12]

Facile à mélanger et à appliquer, à la truelle et au rouleau et une excellente adhérence sur de nombreux supports. Cette résine se compose de deux composants comme il est présenté sur les figures suivantes :



Figure III.4 : les différents composants de sika-dur-330

Le tableau suivant résume les données technique essentiel de **Sika-dur-330**

Tableau III.13 : caractéristiques générales de la résine Sika-dur-330. [12]

Données technique	Résine époxydique
Allongement à la rupture	1.5%
Densité	1.65 kg /l (mélange A+B, à 35 C°)
Retrait	0.04% selon la FIP
Epaisseur par couche	300 mm max
Coefficient de dilatation thermique	2.5×10^{-5} par C°
Couleur	Comp. A blanc Comp. B gris
Résistance en traction	30 Mpa
Viscosité	Pâte ferme
E-Module en flexion	3.8 Gpa

CHAPITRE III : caractérisation des matériaux

III.5.4. Le mortier de réparation:

Un mortier de réparation est un élément de la construction composé de sable, de ciments, et d'additifs. Il permet de réaliser des travaux de remise en état et de protection des ouvrages en béton et en matériaux rigides.

On a formulé notre mortier avec de sable fin Boussaâda et un ciment classe 32.5 Chamill avec l'ajout de fumée de silice et le produit d'adhérence sika-Latex.

Tableau III.14 : La formulation de mortier

Matériaux	sable	Ciment	Eau	Fumé de silice	Sika Latex	E/L
La masse (g)	1350	450	168.75	45	112.5	0.34

A. Sika-latex :

Est une dispersion aqueuse de résine synthétique de densité 1 kg/l qui se présente sous la forme d'un liquide laiteux concentré. Parfaitement miscible, il s'ajoute directement à l'eau de gâchage des mortiers de ciment. On l'utilise comme enduit et chapes et pour le jointement et les travaux de finition de couverture.

Dans notre travail on a visé ce produit pour améliorer fortement l'adhérence du mortier et le rendre plastique et facile à mettre en œuvre



Figure III.5 : produit sika-latex (5L)

CHAPITRE III : caractérisation des matériaux

B. Fumée de silice :

Au microscope électronique, la fumée de silice apparaît sous forme de billes sphériques d'un diamètre moyen de 0.2 μm . Ces billes ont un diamètre moyen 100 fois plus petit que les grains de ciment.

La fumée de silice est extraite en surface du four de réduction par des ventilateurs principaux et résulte de la condensation du gaz SiO , intermédiaire réactionnel du procédé de carbo-réduction.

Elle est ensuite récupérée et filtrée dans un filtre à manches, avant d'être densifiée pour en faciliter la manipulation et elle est d'une couleur grise trop fine dont une SSB de 20m²/g et l'incorporation de fumée de silice dans les bétons conduit à des améliorations remarquables des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons.

Dans notre travail on procéda à l'utilisation de la fumée de silice pour donner une bonne homogénéisation dans le mortier et amélioré ces caractéristiques mécaniques et rhéologique



Figure III.6 : la fumée de silice

Les fumées de silice sont capables d'intervenir selon deux mécanismes :

- L'effet granulaire : Les particules de la fumée de silice étant sphériques, lisses et très petites, viennent combler les interstices entre les grains de ciment. C'est grâce à un produit défloculant que cet effet granulaire peut être obtenu et conduira à une réduction importante de la teneur en eau. C'est la forme de ces particules qui va aider à la mise en place des bétons.
- L'effet pouzzolanique : La fumée de silice, amorphe et riche en silice, peut se combiner à la chaux lors de l'hydratation du ciment, afin de donner des hydrates supplémentaires. Ce mélange permettra d'obtenir des bétons à haute et très haute performance.

CHAPITRE III : caractérisation des matériaux

Le mortier formulé est caractérisé par sa résistance à la compression et à la traction par flexion à 7 jours sur des éprouvettes prismatiques (4*4*16) cm³, les résultats des essais mécaniques sont présentés dans les tableaux qui suivent.



Figure III.7 : essai de traction par flexion



Figure III.8 : essai de compression

Tableau III.15 : résistance à la compression de mortier à 7 et 28 jours

Resistance à la compression 7J (MPa)	Resistance à la compression 28J (MPa)
9.28	26.75

Tableau III.16 : résistance à la traction par flexion de mortier à 7 jours

Resistance à la traction par flexion (MPa)	La moyenne (MPa)
2.62	2.46
2.21	
2.56	

Dans notre cas on a utilisé le mortier pour coller les grilles métalliques et les fibres de verre sur les poutres.

III.5.5. Grilles en fibre de verre :

La géo-grille utilisée est la grille en fibre de verre enduite CIDEX 100 SB de 6D Solutions. C'est un matériau élastique, le grillage carré de mailles de 6 x 6 mm², résulte de l'assemblage de plusieurs matériaux, dont trois composants principaux : des réseaux en fibres de verre de type « chaîne » et de type « trame » et un voile non-tissé en fibre de polyester.

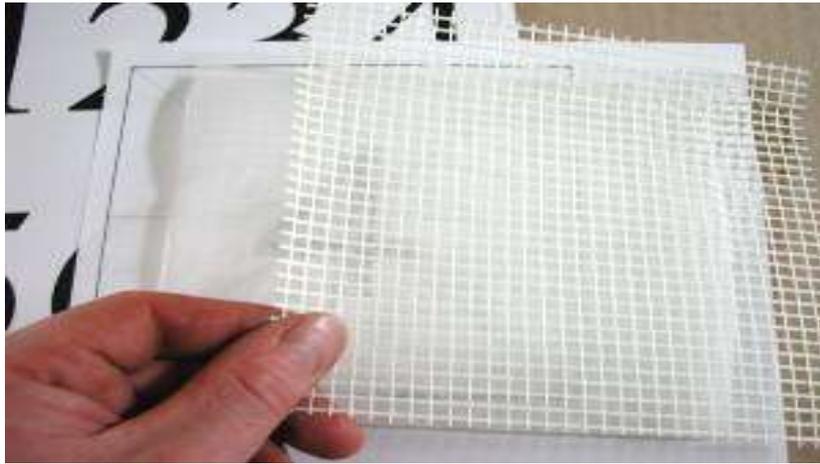


Figure III.9 : grilles en fibres de verre

III.5.6. Les grilles métalliques :

C'est un matériau à base d'un acier dont les mailles de section (**6*6**) **mm²** qui a rôle de renforcer les poutres et améliorer la résistance de béton endommagé à la flexion.



Figure III.10 : grilles métallique

CHAPITRE III : caractérisation des matériaux

III.6. Essai de traction sur les grilles :

On a préparé des éprouvettes de chaque type de grille de section rectangulaire (25*250) mm² comme il est présenté sur les figures suivantes :



Figure III.11 : éprouvettes testées

L'essai de traction des grilles en fibre métallique et grilles en fibre est effectué sur une machine de traction ZWICK-ROWEL de capacité 10KN nous a donné les caractéristiques mécaniques de ces type selon la norme ISO-527.



Figure III.12 : machine de traction zwick-Rowel

CHAPITRE III : caractérisation des matériaux

Après la disposition des éprouvettes sur la sur la machine, on fixe la vitesse à 1mm/mn puis on lance l'opération.



Figure III.13 : disposition des grilles sur la machine de traction

Les résultats obtenus sont présentés sur le tableau suivant :

Tableau III.17 : caractéristique mécanique des grilles utilisées

Type de grille	Rapport poids/surface (g/m ²)	Module de Young (GPa)	Force de traction (N)	Déplacement (mm)	Déformation (%)	Diamètre (mm)
Verre	85.7	2.93	350	3.25	2.25	0.27
Métallique	630	3.95	320	70	46	0.9

CHAPITRE IV

Description des types de renforcements

Chapitre IV : Description des types de renforcements

IV.1. Description des poutres testées :

Dans cette étude expérimentale de réparation des éléments en béton on a fabriqué 27 éprouvettes prismatiques de dimension (15*15*60) cm³ dont 3 éprouvettes témoins de classe 32.5MPa

Dans ce travail on a renforcé les poutres à l'aide des matériaux composites collés à l'aide d'un mortier et un produit de colle sika-dur-330 comme il est bien expliqué dans les parties qui suit.

IV.2. Procédures de mise en œuvre des poutres :

- Préparation des granulats : sable, gravier, ciment en 1^{er} lieu.



Sable



Gravier



Ciment

Figure IV.1 : les granulats (sable, gravier, ciment)

- Préparation des moules prismatiques (15*15*60) cm³ pour le graissage par un agent démoulant pour un meilleur détachement du béton de leurs surfaces après 24H.

- On procède au gâchage dans un malaxeur dont un malaxage sec pendant 15s après on ajoute de l'eau et on continue l'opération pendant 3 min jusqu'à obtention d'un béton fluide.



Figure IV.2 : le malaxage

Chapitre IV : Description des types de renforcements

- Versement du béton dans les éprouvettes à moitié volume, puis les placer sur la table vibrante jusqu'à avoir l'excédent d'eau pour une bonne homogénéisation.



Figure IV.3 : mise en place des poutres sur la table vibrante

- Le remplissage des éprouvettes à volume plein de béton et la vibration finale.
- Une phase de repos de 24h avant démoulage.



Figure IV.4 : les éprouvettes à l'état de repos à l'air libre



Figure IV.5 : éprouvettes après démoulage.

Chapitre IV : Description des types de renforcements

- On place les éprouvettes dans la chambre humide à une température de **20°C** pour une durée de 28 jours selon la norme européenne (NF2001) pour assurer un bon murissement des poutres et une excellente hydratation de ciment.

IV.3. Notation des poutres testées :

Pendant la durée de stage pratique on a confectionné vingt sept (27) éprouvettes en béton de section (150*150) mm² avec une longueur de 600 mm, ces poutres sont désignées :

- ✓ Trois (3) poutres en béton témoin
- ✓ Vingt quatre (24) renforcées par un collage des matériaux composites comme des tissus en fibre de verre et en fibre de carbone et aussi par des grilles en fibre de verre et en grilles métalliques. Ces poutres sont distribuées en huit (8) variantes selon la configuration géométrique de renforcement
 - Variante A : trois (3) poutres renforcées par un tissu de fibre de carbone (PRFC) sur la surface inférieure (150* 400) mm² de la poutre.
 - Variante B : trois (3) poutres renforcées par un tissu de fibre de verre (PRFC) sur la surface inférieure (150*400) mm² de la poutre.
 - Variante C : trois (3) poutres renforcées par une grille en fibre de verre (TRM) sur la surface inférieure (150*400) mm² de la poutre.
 - Variante D : trois (3) poutres renforcées par une grille métallique (TRM) sur la surface inférieure (150*400) mm² de la poutre.
 - Variante E : trois (3) poutres renforcées par deux (2) couches de grille en fibre de verre (TRM) sur la surface inférieure (150*400) mm² de la poutre.
 - Variante F : trois (3) poutres renforcées par deux (2) couches de grille métallique (TRM) sur la surface inférieure (150*400) mm² de la poutre.
 - Variante G : trois (3) poutres renforcées par une grille en fibre de verre (TRM) sur la surface inférieure et les semis parois extérieures de la poutre sous forme U
 - Variante H : trois (3) poutres renforcées par une grille métallique (TRM) sur la surface inférieure et les semis parois extérieures de la poutre sous forme U

Les différentes variantes de renforcement des poutres sont présentées dans le tableau (IV.1) :

Chapitre IV : Description des types de renforcements

Tableau IV.1 : aperçu des neuf variantes

variantes	Photos correspondantes
Poutre témoins	
A : PRFC	
B : PRFV	
C : GV1C	
D : GM 1C	
E : GV 2C	
F : GM 2C	
G : GV'U'	
H : GM 'U'	

Chapitre IV : Description des types de renforcements

IV.4. Mode de renforcement :

Le travail est partagé selon deux méthodes de collage de matériaux composite :

IV.4.1. Collage des grilles de composite par mortier (TRM) :

Ce type de renforcement est réalisé selon les étapes suivantes :

- **Traitement de surface des poutres en béton :**

Le traitement de la surface des poutres est également très important pour éviter le risque de particules friables qui diminueront l'adhérence, cette technique se poursuit jusqu'à avoir une surface dure et poreuse

Avant l'application de mortier on doit assurer la propreté de la surface par un brossage et un nettoyage humide, le résultat de cette étape est présenté sur la figure suivante :



Figure IV.6 : les étapes de traitement de la surface des poutres

Chapitre IV : Description des types de renforcements

▪ Préparation des grilles :

On découpe soigneusement les grilles métalliques et les grilles en fibre de verre aux dimensions désirées et indiquées après on les met dans un espace propre et sec

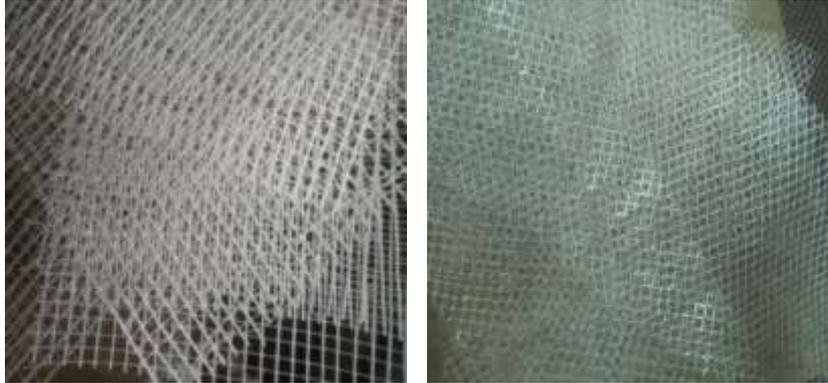


Figure IV.7 : préparation des grilles

▪ Préparation de mortier :

La réparation par mortier est l'une des méthodes les plus utilisées pour les structures. Comme il est mentionné sur le tableau (III.11) de la composition de mortier on possède au gâchage des matériaux (sable+fumé de silice+sika latex+eau) selon les quantités précises pendant 4 min à 20°C.

Le mélange a été poursuivi jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène et adhérente comme présentée sur la figure



Figure IV.8 : le mortier de réparation

Chapitre IV : Description des types de renforcements

IV.4.1.1. Application de mortier sur les poutres pour collage de grilles :

-Par une seul couche de mortier :

On applique a l'aide d'une raclette à mortier la première couche de 3mm de mortier sur la partie tendue de la poutre (support), après on place la grille sur la couche appliquée et on l'imbibe dans le sens longitudinal sans forcer et sans déformation des grilles dans le mortier, puis on applique de ce dernier sur le support béton (poutre) pour avoir une couche finale de 6mm bien finie et présentée (variantes C et D), comme il est illustré sur les figures suivantes :

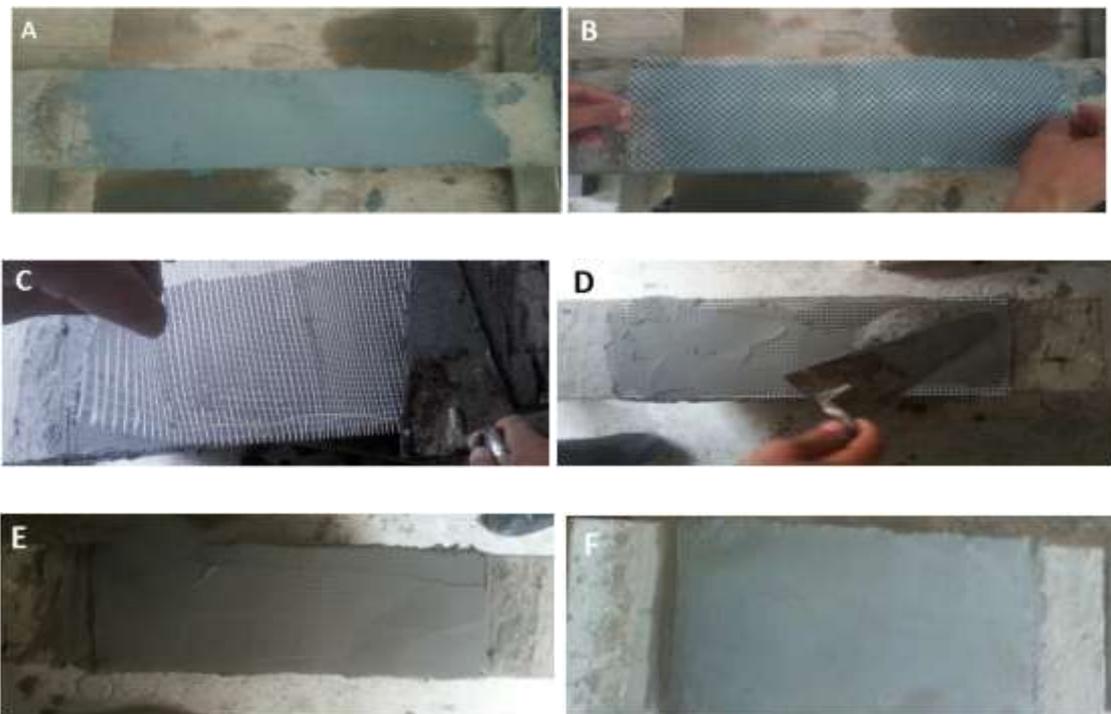


Figure IV.9 : les étapes de mise en place des grilles.

-Collage Par deux couches de mortier :

C'est la même procédure avec le collage par une seule couche de mortier mais cette fois on utilise deux grilles de composites (verre ou métal) à la fois sur le même support béton (variantes E et F) et on applique une deuxième couche de mortier après l'emplacement de deuxième grille (soit en verre ou en métal) comme il est présenté sur les figures suivantes :



Figure IV.10 : Application de deuxième couche en mortier sur les grilles

-Collage Par une couche sous forme 'U' :

La préparation de tissus se faite selon les étapes suivants :

- Découper le tissu aux dimensions appropriées et souhaitées dans notre travaille le découpage est comme suite, *largeur=30 cm* et *longueur=40cm*
- Ne pas endommager les extrémités découpées et plier le tissu
- Le conserver toujours en position roulée.

Pour l'application sur le renfort il faut suivre les étapes suivantes :

- 1- Appliquer la première couche (1à 3 mm) de mortier sur la surface de l'éprouvette et les deux cotés des parois extérieures.



Figure IV.11 : application de la couche de mortier sur la surface tendue et les surfaces latérales.

- 2- Conformément au calepinage et au dimensionnement souscrit, on place les fibres découpées de coté longueur 40 cm sur la couche de mortier, puis on prend 7.5 cm des deux extrémités de coté largeur et les plier sous forme U (variantes **G** et **H**)

Chapitre IV : Description des types de renforcements



Figure IV.12 : positionnement des grilles en fibres de verre et métallique.

- 3- Le tissu doit être posé correctement suivant les dimensions et bien plié et sans étirement excessif.
- 4- Ont ajoute une deuxième couche de mortier (1 à 3 mm).



Figure IV.13 : application de 2ème couche de mortier sur le support

- 5- Répartir le mortier au moyen d'une cuillère jusqu'à l'obtention d'une structure bien homogène.



Figure IV.14 : séchage des éprouvettes préparées à l'air libre pendant 28 jours

Chapitre IV : Description des types de renforcements

4.1.2. Collage des matériaux composites (tissus) :

A- Préparation du support béton

La préparation du support de béton ci pour éliminer toute trace superficielle pour donner une partie hétérogène.

- La surface du béton être propre, de produits non adhérentes et de tout enduit de type graisse et d'huile.
- Il doit être sec (taux d'humidité inférieur 4 %).
- Le support béton doit avoir au moins un âge de 28 jours, doit être préparé de façon à créer un état de rugosité suffisant et éliminer la surface présentant peu de cohésion.
- Nettoyage de surface des éprouvettes à l'aide de lamelle avec un disque de ponçage et disque de brosse métallique
- Dépoussiérer avec de l'eau et une éponge pour absorber tout l'eau

B- Préparation de tissus composites (PRFC et PRFV)

La préparation de tissus selon les étapes suivantes :

- Découper le tissu aux dimensions appropriées et souhaitées dans notre travail

comme suite, largeur=15 cm et longueur=40cm

- Ne pas endommager les extrémités découpées et on évite de plier le tissu
- Le conserver toujours en position enroulé.



Figure IV.15 : découpage de fibre de carbone

Chapitre IV : Description des types de renforcements

C. Préparation de la colle Sika-dur-330

- Homogénéiser chaque composant séparément dans son emballage.
- Verser le composant **B** (durcisseur) dans le composant **A** (résine) en respectant le rapport de malaxage **A:B=4 :1** en fonction du poids.
- dans notre travail on a mélangé 400g de composant **A** avec 100g de composant **B**
- Mélanger bien les deux composants jusqu' obtenir un mélange uniforme de couleur grise.



Composant(B)

composant (A)



Figure IV.16 : mélange des composants A et B

D. Etapes d'application sur le support

Pour l'application sur le support il faut suivre les étapes suivantes :

- 6- Appliquer la première couche (1à 2 mm) de résine Sikadur -330 sur la surface de l'éprouvette, l'aide d'un pinceau.
- 7- Conformément au calepinage et au dimensionnement souscrit, placer le tissu découpé sur la couche d'apprêt, en veillant à l'orientation correcte du sens des fibres (tissu unidirectionnel).
- 8- Le tissu doit être posé sans pli et sans étirement excessif
- 9- Le tissu doit être fermement plaqué sur le support par un marouflage (réalisé au moyen d'un rouleau) permettant l'imprégnation de la colle dans les fibres et l'élimination des bulles d'air éventuelles.

Chapitre IV : Description des types de renforcements

10- Répartir la résine au rouleau jusqu'à l'obtention d'une structure homogène (variantes **A** et **B**)



Figure IV.17 : application de la couche de colle sur la surface de béton



Figure IV.18: positionnement des matériaux composite (PRFV) et (PRFC)

11- presser fortement a l'aide d'un rouleau



Figure IV.19 : marouflage des tissus

Chapitre IV : Description des types de renforcements

11- on Laisse les éprouvettes sécher a l'aire libre jusqu'à 24h



Figure IV.20 : séchage des éprouvettes préparées à l'aire libre.

CHAPITRE V

Résultats et discussion

Chapitre V : résultats et discussion

I. Procédures d'essai de flexion :

La résistance à la traction par flexion a été déterminée au moyen d'une machine de flexion trois (3) points de type 3R et de capacité 200 KN le chargement a été appliqué en fonction de déplacement a une vitesse de 0.03MPa/s (figure V.1)

La flèche à mi-portée est mesurée a l'aide de deux (2) capteurs automatiques reposés sur des supports en métal placés autour de l'éprouvette testé (figure V.2)

Après la disposition des poutres dans la machine avec un centrage excellent dont la partie libre d'éprouvette était de 400mm on possède à l'écrasement

Les valeurs de la force de chargement et le déplacement correspondant ont été enregistré simultanément sur un ordinateur.

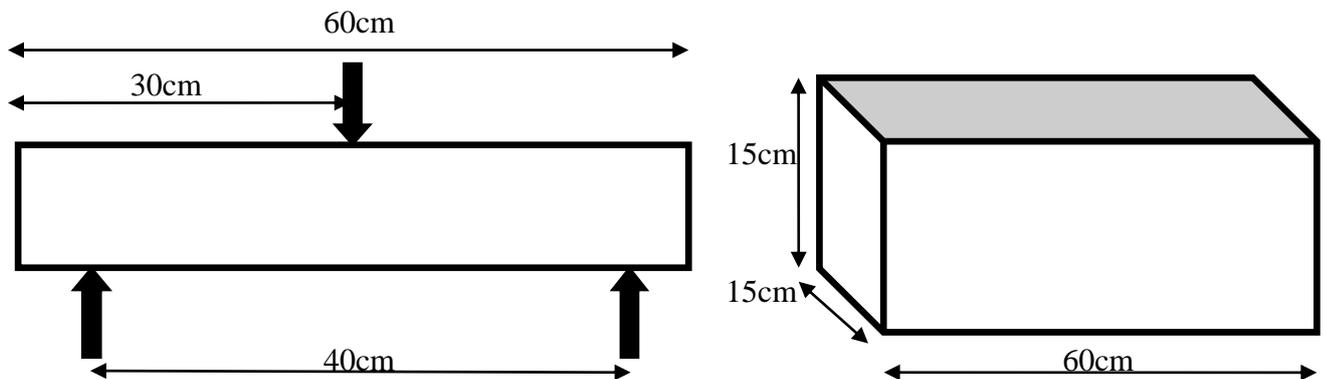


Figure V.1 : essai de flexion 3 points



Figure V.2 : schéma de disposition de la poutre sur la machine

Chapitre V : résultats et discussion

V.2. Essai de flexion des poutres :

V.2.1. Béton de référence (BT) :

Après 28j de durcissement, les poutres sont testées sous chargement de flexion 3 points jusqu'à la rupture, la première série d'essai comporte 3 poutres non renforcées considérées comme poutres témoins

Les résultats sont présentés dans le tableau (V.1) et la courbe moyenne force/flèche à mis travée des trois (3) poutres est donnée dans la figure (V.3).

Tableau V.1 : résultats d'essai de flexion 3 points des poutres témoins

poutres	Charge ultime (KN)		Contrainte (MPa)		Flèche (mm)		pooids (KG)
P1	21.3	21.33	3.8	3.8	1.6	1.46	32.14
P2	21.3		3.8		1.4		
P3	21.4		3.8		1.4		

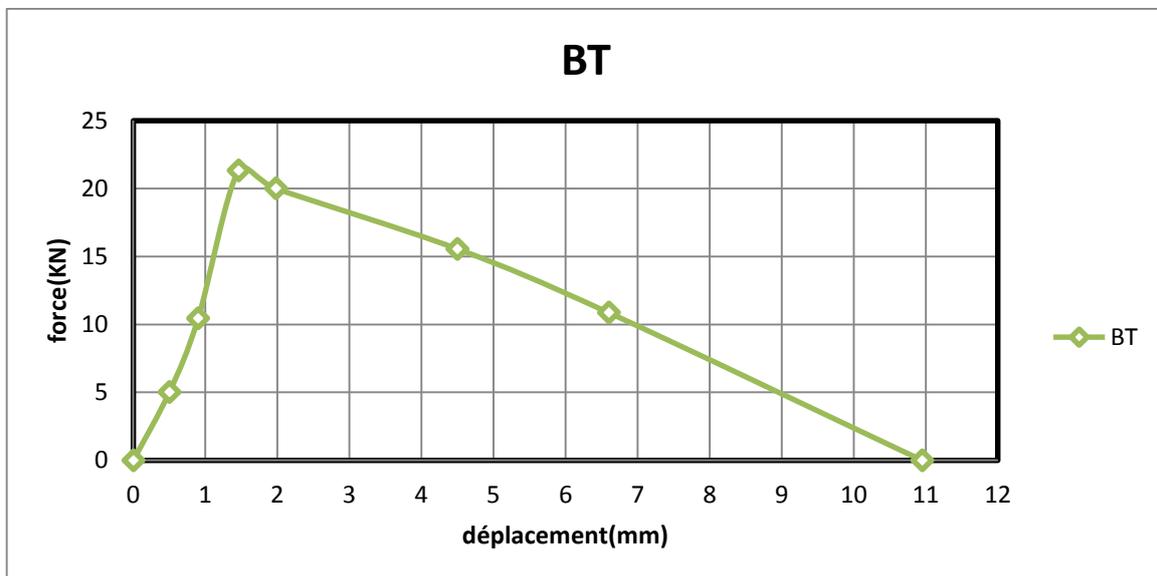


Figure V.3 : Courbe charge/déplacement des poutres témoins

Chapitre V : résultats et discussion

La courbe force/flèche présente 3 phases :

- Une phase s'étend jusqu'à 20MPa avec l'apparition des fines fissures verticales dues au moment fléchissant, la flèche atteinte à ce point est de 0.75mm
- Une phase parabolique de rupture à 21.33MPa dont l'apparition des fissures augmente et basé à mi-travée (au milieu) de l'éprouvette et le béton atteint sa résistance maximale avec une flèche de 1.46mm
- Une phase descendante jusqu'à 0KN dont la poutre se découpe en deux morceaux avec une flèche de 10.95mm.

V.2.2. les poutres renforcées en fibres de polymères (PRF):

Dans cette étude on a confectionné trois (3) éprouvettes pour chaque type de renforcement dont les résultats d'essai de traction par flexion de ces poutres renforcées par des tissus en fibre de carbone (PRFC) et des tissus en fibre de verre (PRFV) obtenus sont présentés dans le tableau (V.2)

Tableau V.2 : résultats d'essai de flexion des poutres renforcées en PRF

	poutres	Charge ultime (KN)	Contrainte (MPa)	Déplacement (mm)	pooids (Kg)
BT	P1	21.3	3.8	1.6	32.14
	P2	21.3	3.8	1.4	
	P3	21.4	3.8	1.4	
PRFC	P1	41.7	6.2	2.5	33.43
	P2	46.5	8.3	2.5	
	P3	34.9	7.4	2.5	
PRFV	P1	35.3	7.2	2.75	34.33
	P2	38.91	6.3	2.0	
	P3	40.3	6.25	2.3	

Chapitre V : résultats et discussion

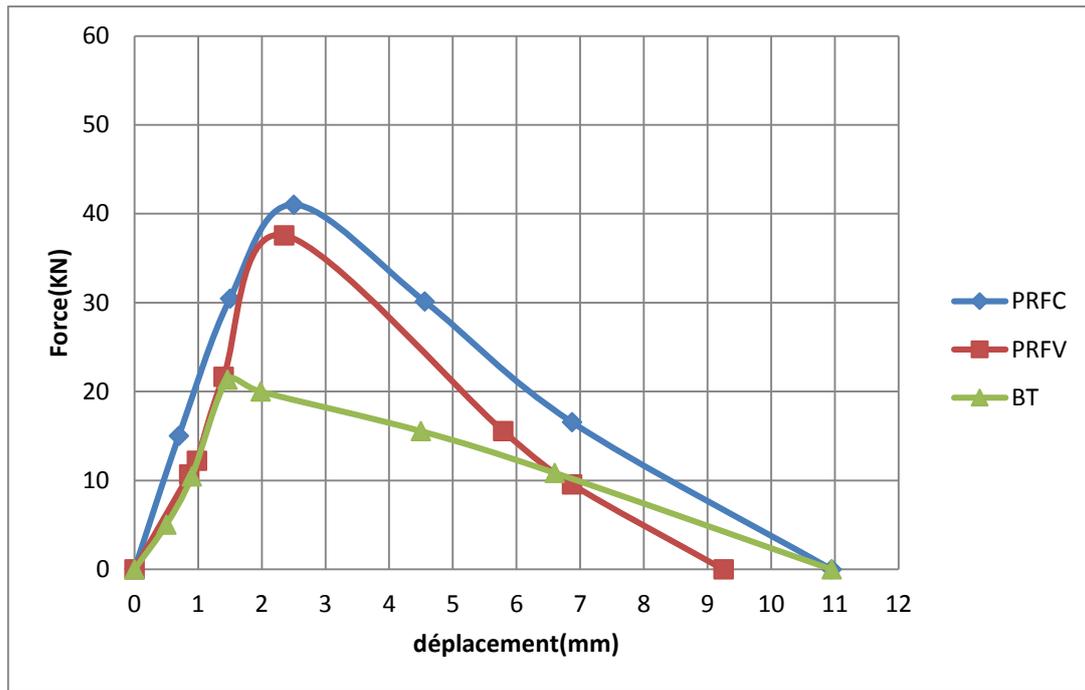


Figure V.4 : courbes correspondantes aux poutres renforcées en PRF

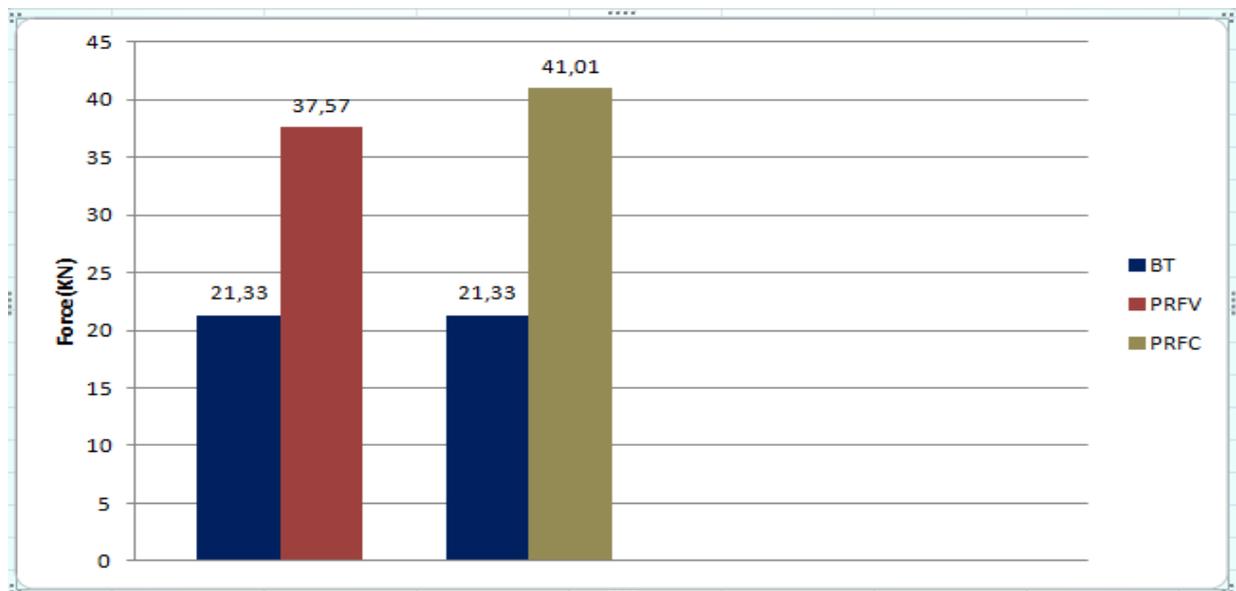


Figure V.5 : comparaison des charges ultimes entre PRFV/PRFC par rapport au témoin.

Interprétations :

Les résultats obtenus montrent que les poutres renforcées par les PRFC et PRFV ont une bonne résistance à la flexion ainsi qu'une charge de rupture par rapport aux poutres témoins d'intervalle de (16kN à 20kN) de différence de gain varie entre (42% à 46%) et une

Chapitre V : résultats et discussion

augmentation de la flèche à la rupture entre (37% à 41%) grâce aux caractéristiques mécaniques améliorées des PRF.

Les poutres renforcées par (PRFC) ont une meilleure résistance à la flexion par rapport aux poutres renforcées en (PRFV) d'une différence de 3,5KN (8,5%) de gain.

Le déplacement (flèche) obtenue montre que celle des PRFC est élevée ($\Delta_{PRFC}=2.5\text{mm}$) par rapport à celle de PRFV ($\Delta_{PRFV}=2.35\text{mm}$) et elle est d'une différence de 6%.

V.2.3. les poutres renforcées en TRM (Textile Reinforced Mortel):

V.2.3 .1 Effet de type du renfort et de nombre de couche différent :

A. TRM en grille de verre:

Après le renforcement des poutres en fibre de verre par une seule couche de mortier (GV1C) et de deux couches (GV2C) de mortier on possède à l'écrasement des éprouvettes, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau (V.3).

Tableau V.3 : résultats d'essai de flexion des poutres renforcées en grilles de fibre de verre (TRM)

	poutres	Charge ultime (KN)		Contrainte (MPa)		Déplacement (mm)		poids (Kg)
BT	P1	21.3	21.33	3.8	3.8	1.6	1.46	32.14
	P2	21.3		3.8		1.4		
	P3	21.4		3.8		1.4		
G.V 1C	P1	24.6	23.66	5.0	4.83	1.5	2.13	32.51
	P2	25.1		5.1		2.9		
	P3	21.3		4.4		2.0		
G.V 2C	P1	27.1	27.2	5.5	5.83	0.75	0.88	34.47
	P2	25.1		6.0		0.8		
	P3	29.4		5.96		1.1		

Chapitre V : résultats et discussion

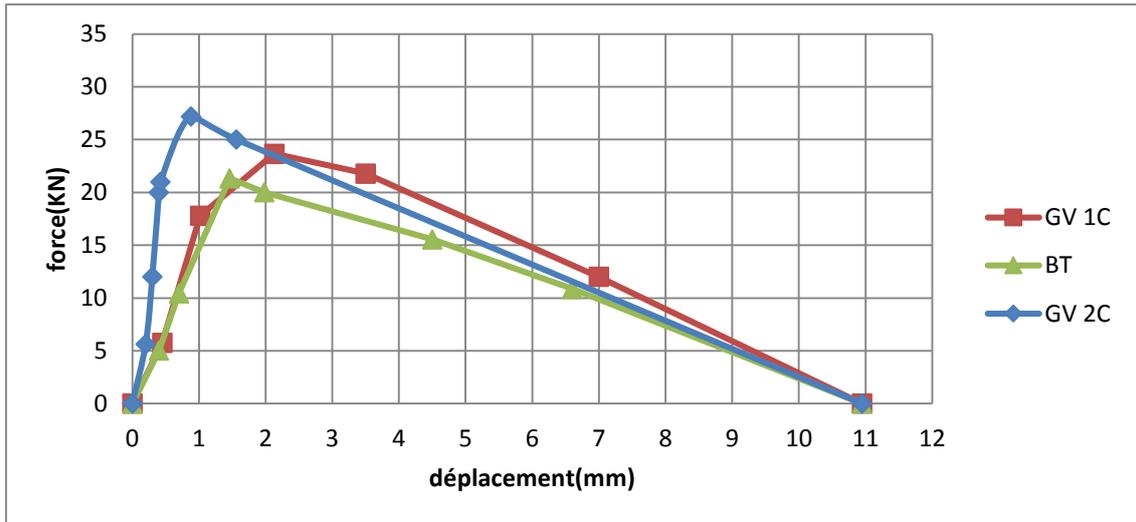


Figure V.6: courbes correspondantes aux poutres renforcées par les grilles en verre (TRM)

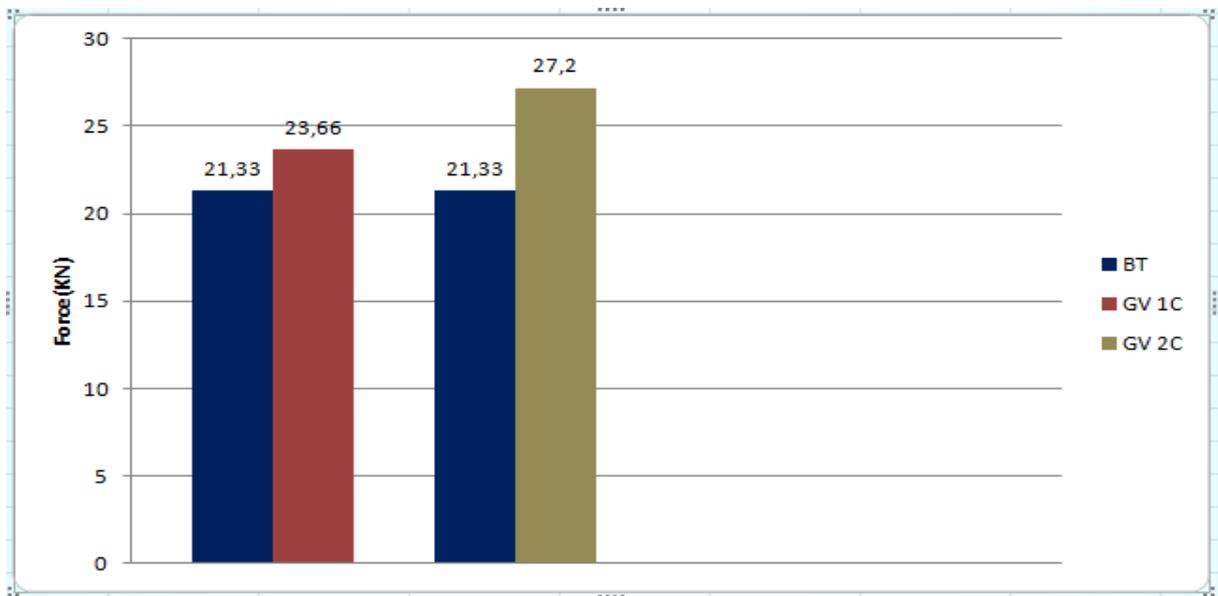


Figure V.7 : comparaison des charges ultimes entre GV1C/GV2C par rapport au témoin.

Interprétations :

Les résultats obtenus montrent que les poutres renforcées par les (TRM) ont une force de rupture supérieure et une bonne résistance à la flexion par rapport aux poutres témoins, et une amélioration de la flèche à la rupture, ceci peut être expliqué par les caractéristiques mécaniques élevées des fibres de verre et le module d'élasticité élevé, et aussi leur bonne résistance à la traction.

Chapitre V : résultats et discussion

Les poutres renforcées par les grilles en fibres de verre deux couches de mortier (GV 2C) ont une charge supérieure par rapport à celle de (GV1C) d'une différence égale à $(F=2.66KN)$ d'ordre de 10% avec une amélioration de déplacement remarquable de l'ordre de 13%.

Cette amélioration est liée au nombre de couches de grilles et l'influence de l'épaisseur de la couche de mortier.

B. TRM de grille métallique:

Les résultats de l'essai de flexion des poutres renforcées en grilles métalliques d'une seule couche de mortier (GM 1C) et de deux couches (GM2C) sont présentés dans le tableau (V.4)

Tableau V.4 : résultats d'essai de flexion des poutres renforcées par les grilles métalliques

	Poutres	Charge Ultime (KN)		Contrainte (MPa)		Déplacement (mm)		Poids (Kg)
BT	P1	21.3	21.33	3.8	3.8	1.6	1.46	32.14
	P2	21.3		3.8		1.4		
	P3	21.4		3.8		1.4		
GM 1C	P1	27.8	26.46	5.7	5.53	1	1.33	33.5
	P2	26.4		5.4		1.9		
	P3	25.2		5.1		1.1		
GM 2C	P1	27.3	29.53	5.8	6.27	1.7	1.36	34.2
	P2	32.8		6.96		1.2		
	P3	28.5		6.05		1.2		

Chapitre V : résultats et discussion

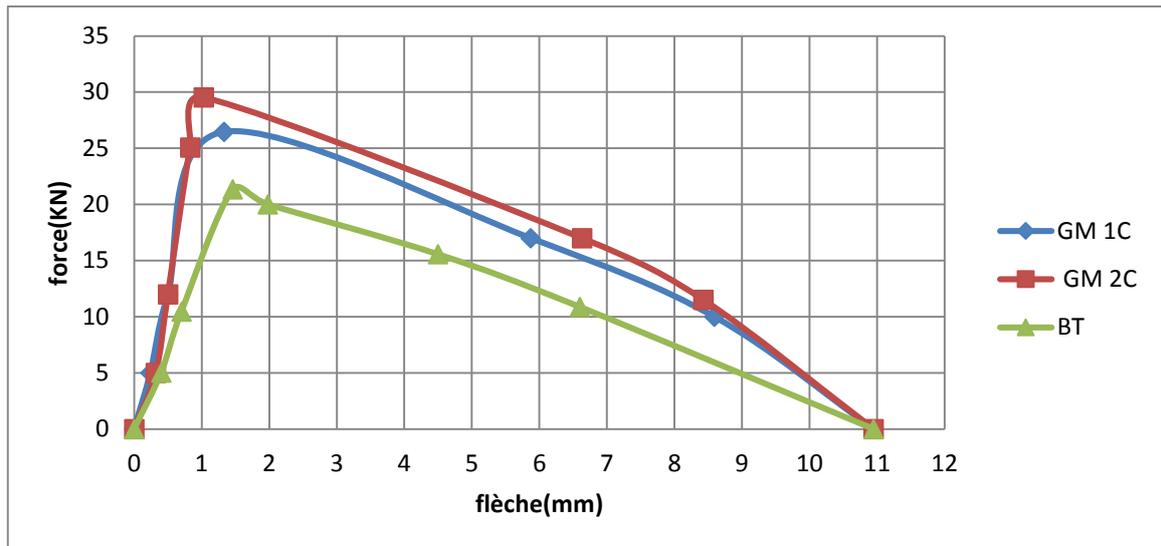


Figure V.8 : courbes correspondantes aux poutres renforcées en TRM de grilles métalliques

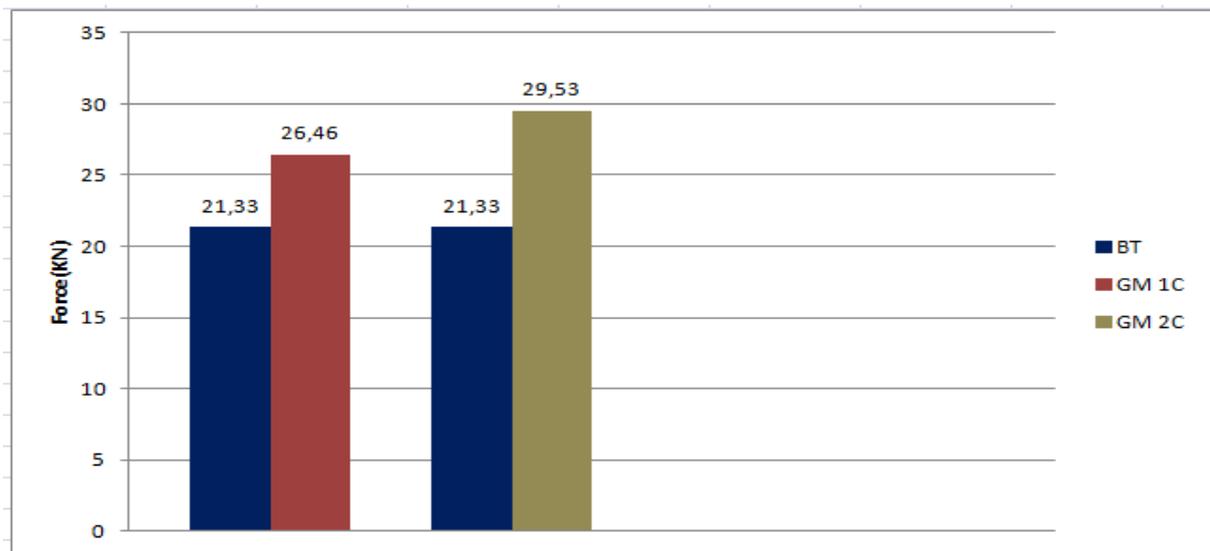


Figure V.9 : comparaison des charges ultimes entre GM1C/GM2C par rapport au témoin

Interprétations :

Les résultats obtenus montrent que les poutres renforcées par les (TRM) ont une force de rupture supérieure et une bonne résistance à la flexion par rapport aux poutres témoins, et une amélioration de la flèche à la rupture, ceci peut être expliqué par les caractéristiques mécaniques élevées des grilles et le module d'élasticité élevé des deux grilles métalliques utilisées et l'influence de l'épaisseur de la couche de mortier ainsi que leurs bonne résistance à la traction

Chapitre V : résultats et discussion

Les poutres (GM 2C) ont une force de rupture ($F=29.5\text{KN}$) supérieure par rapport aux poutres renforcées par (GM 1C) qui égale à ($F=26.45$) d'un gain de l'ordre de 10% avec une amélioration de la flèche de l'ordre de 2.2%.

L'amélioration est liée au nombre de couche de grilles métalliques et l'influence de l'épaisseur de la couche de mortier.

V.2.3.2. Effet de géométrie et type de renfort :

Tableau V.5 : résultats de flexion des poutres renforcées par grille en fibre de verre et en grille métallique sous forme 'U' (jaquette)

	Poutres	Charge Ultime (KN)		Contrainte (MPa)		Déplacement (mm)		Poids (Kg)
BT	P1	21.3	21.33	3.8	3.8	1.6	1.46	32.14
	P2	21.3		3.8		1.4		
	P3	21.4		3.8		1.4		
GV 'U'	P1	30.1	31.61	6.1	6.41	1.25	1.73	35.39
	P2	34.77		7.05		1.81		
	P3	29.96		6.05		2.13		
GM 'U'	P1	34.8	36.2	7.1	7.4	1.6	1.66	35.75
	P2	37.6		7.7		1.63		
	P3	36.2		7.4		1.75		

Chapitre V : résultats et discussion

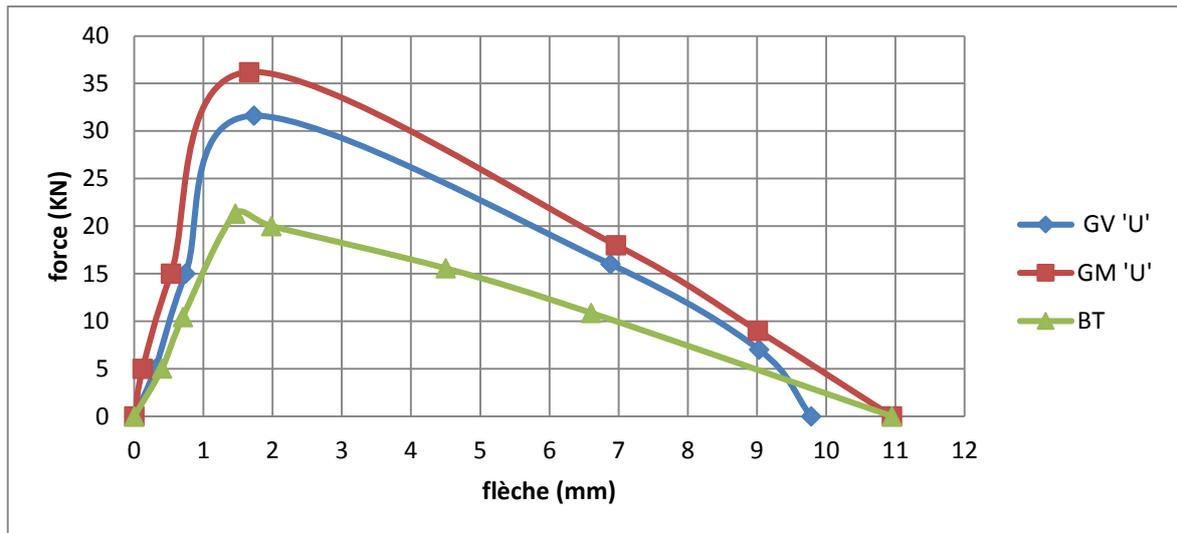


Figure V.10 : courbes correspondantes aux poutres renforcées en TRM de grille en fibre de verre et de grille métallique forme 'U'

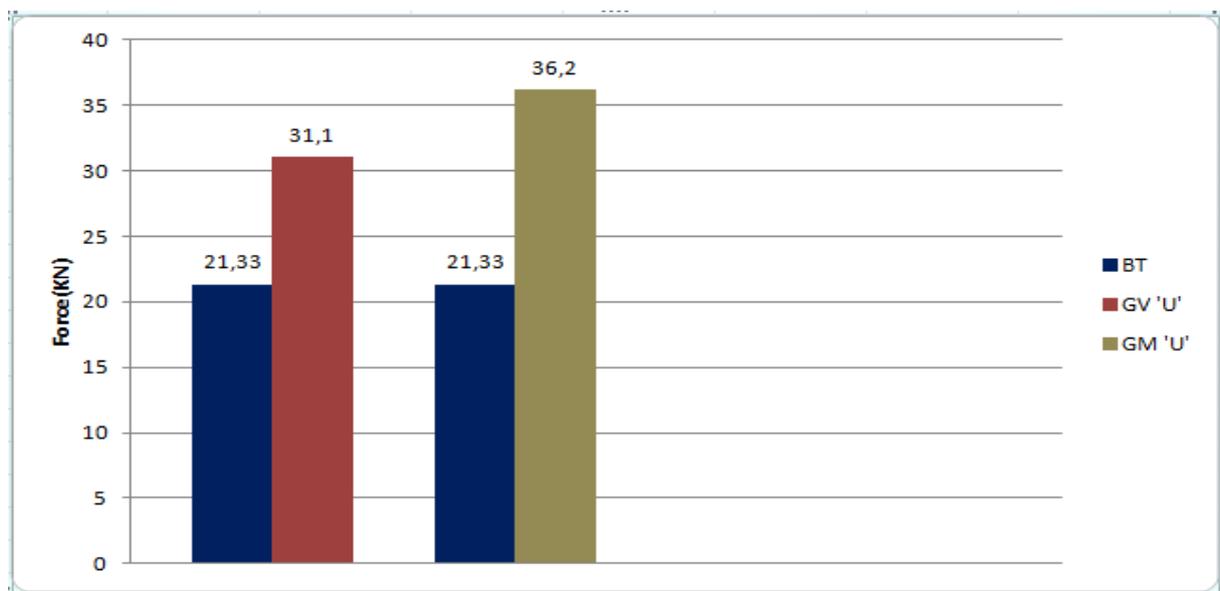


Figure V.11 : comparaison des charges ultimes entre GV'U'/GM'U' par rapport au témoin.

Interprétations :

Les résultats obtenus montrent que les poutres renforcées par les (GV 'U') et (GM 'U') résistent plus à la flexion, avec une force de rupture supérieure par rapport à la poutre témoin. Ceci peut être expliqué par les caractéristiques mécaniques des grilles en fibres de verre et grille métalliques et leur géométrie (jaquette) et au mode d'utilisation ce forme de 'U' pour éviter et minimiser l'effort tranchant par le renforcement des faces latérales.

Chapitre V : résultats et discussion

Les poutres renforcées par (GM 'U') avec la poutre renforcée par les (GV'U') on résulte que les poutres (GM 'U') résistent plus ($F=36.2$) et donnent des résultats mieux que (GV'U') dont force de rupture obtenue est ($F=31.1$), la différence est de 5KN d'ordre 14% de gain en charge.

La différence de la flèche (déplacement) entre ces deux types de renforcement est de l'ordre de 4%.

Cette amélioration est liée au module d'élasticité et aux caractéristiques mécaniques élevées de grille en fibre métallique par rapport à la grille en fibre de verre.

V.2.3.3. comparaison entre les TRM selon le type de renfort (GV2 et GM2C) :

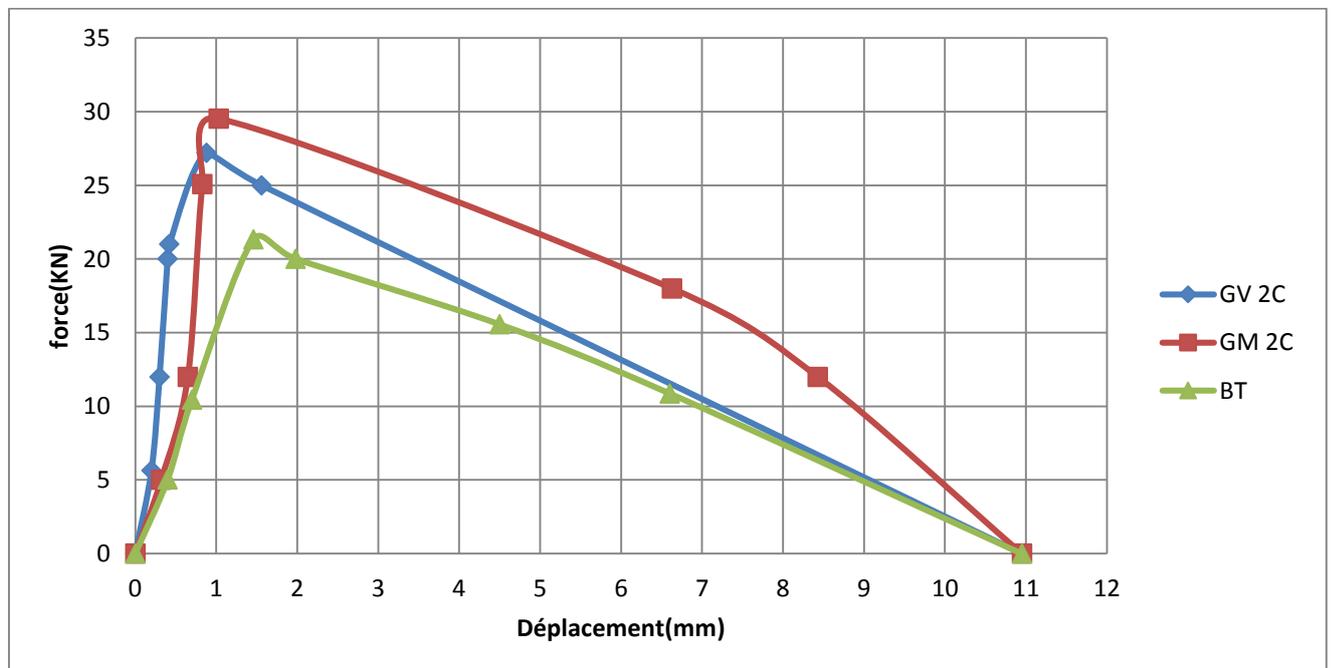


Figure V.12 : courbes correspondantes aux charges ultimes entre GMV2C/GM2C par rapport au témoin

Chapitre V : résultats et discussion

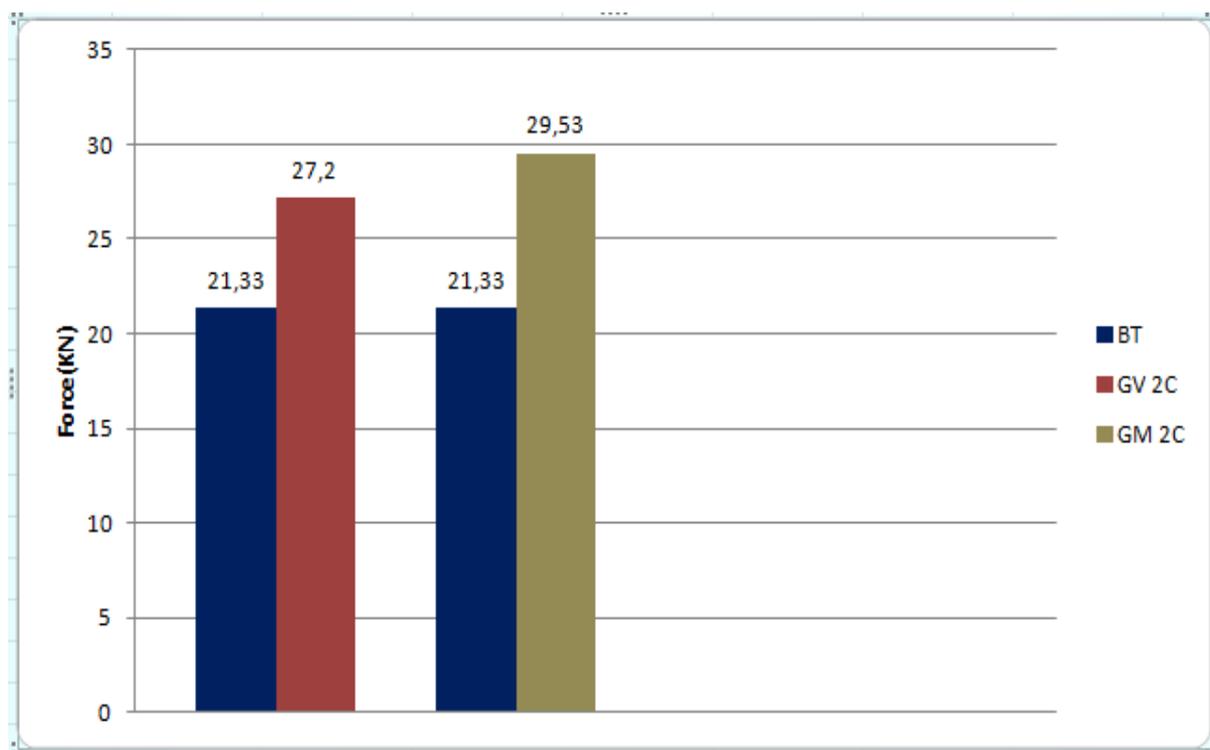


Figure V.13: comparaison des charges ultimes entre GMV2C/GM2C par rapport au témoin.

Interprétations :

Les résultats obtenus montrent que la poutre renforcée par les (TRM) ont une bonne résistance à la flexion et une force de rupture supérieure par rapport à la poutre témoin avec une différence de 6kN à 8kN d'ordre 22% à 27% de gain de charge.

Les poutres renforcées par (GM 2C) avec la poutre renforcée par (GV 2C), différence d'intervalle de 0 à 0,4mm qui est négligeable de point de vue flèche à la rupture, et la déformation des deux cas est presque la même.

L'amélioration de résistance à la flexion avec une petite augmentation de la charge pour (GM 2C) de l'ordre de 8% par rapport au (GV 2C) qui est presque négligeable liée aux types de renfort.

Chapitre V : résultats et discussion

V.3. comparaison des variantes :

V.3.1. PRF avec les TRM (GM2C et GV2C) selon le type et nombre de couche:

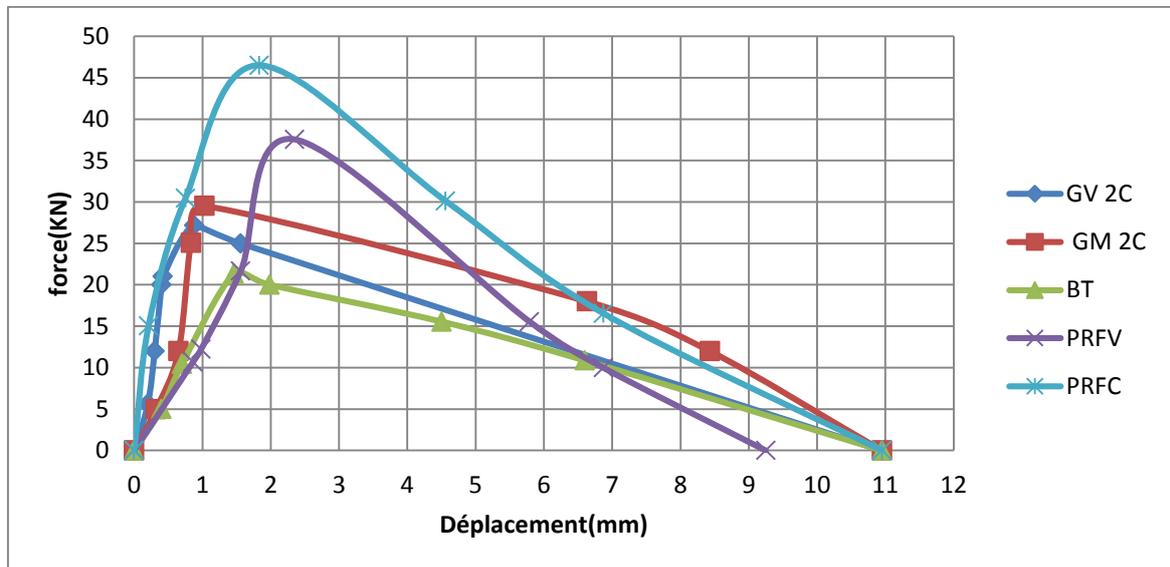


Figure V.14: comparaison des charges ultimes entre GM1C/GM2C et les PRF par rapport au témoin.

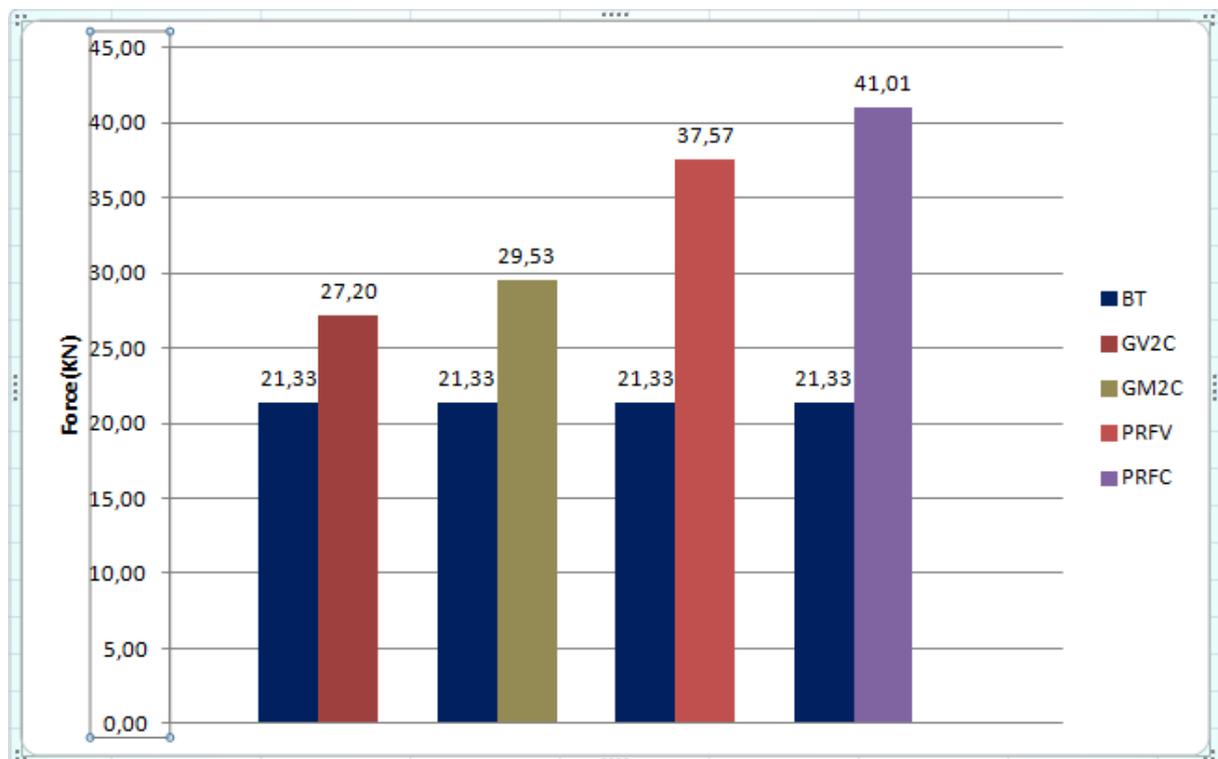


Figure V.15: comparaison des charges ultimes entre G2CC/GM2C et le PRF par rapport au témoin.

Chapitre V : résultats et discussion

Interprétations :

Les poutres renforcées en PRF et TRM donnent des résultats élevés par rapport au béton témoin dont une différence est très importante d'amélioration de charge et déplacement.

D'après les résultats obtenus on a trouvé que le renforcement en PRFC donne une amélioration importante ($F=41.01\text{KN}$) par rapport aux poutres (TRM) renforcées en deux couches de mortier (GV2V et GM2C) avec une différence de 28% à 34% de gain de charge.

Le renforcement par le PRFV est meilleur par rapport au TRM (GM2C et GV2C) avec une grande différence de l'ordre de 21% à 27% de gain de charge.

Du point de vue de flèche de rupture on a constaté une différence excellente de pour les PRF sachant qu'ils ont un module d'élasticité élevé par rapport au module des grilles utilisées donc on aura des déformations faibles des PRF par rapport aux TRM.

V.3.2. TRM selon la géométrie et le nombre de couche de renforcement:

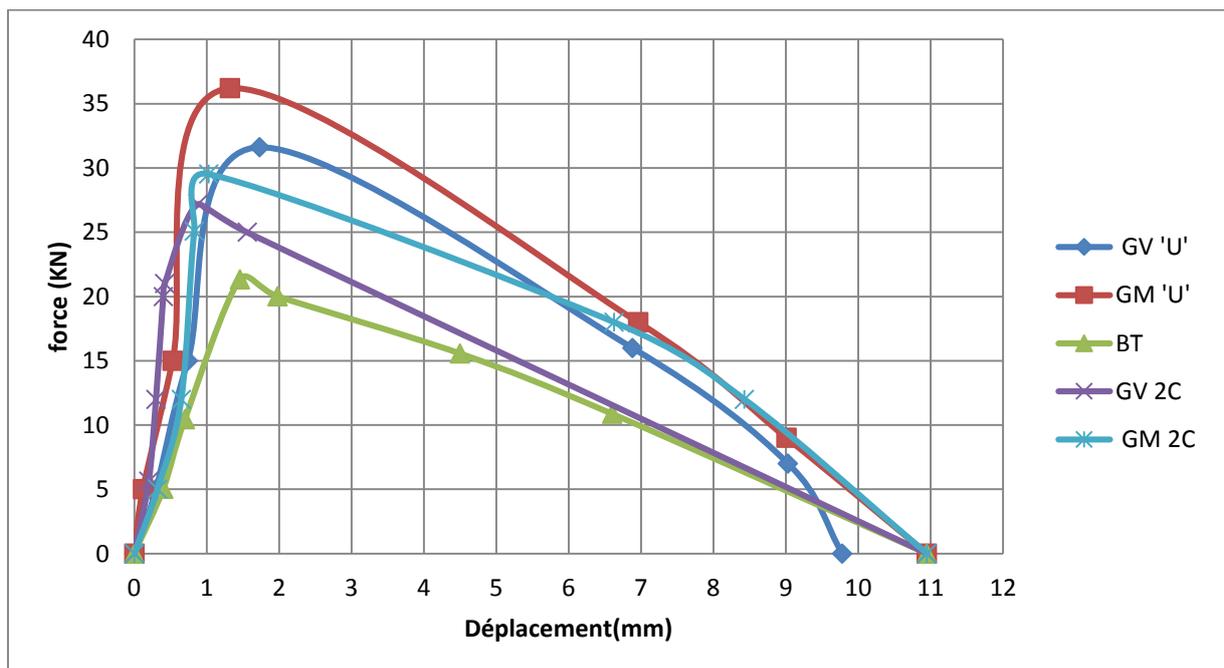


Figure V.16: courbe comparatif entre les TRM (GV2C/GV2M) avec le béton témoin

Chapitre V : résultats et discussion

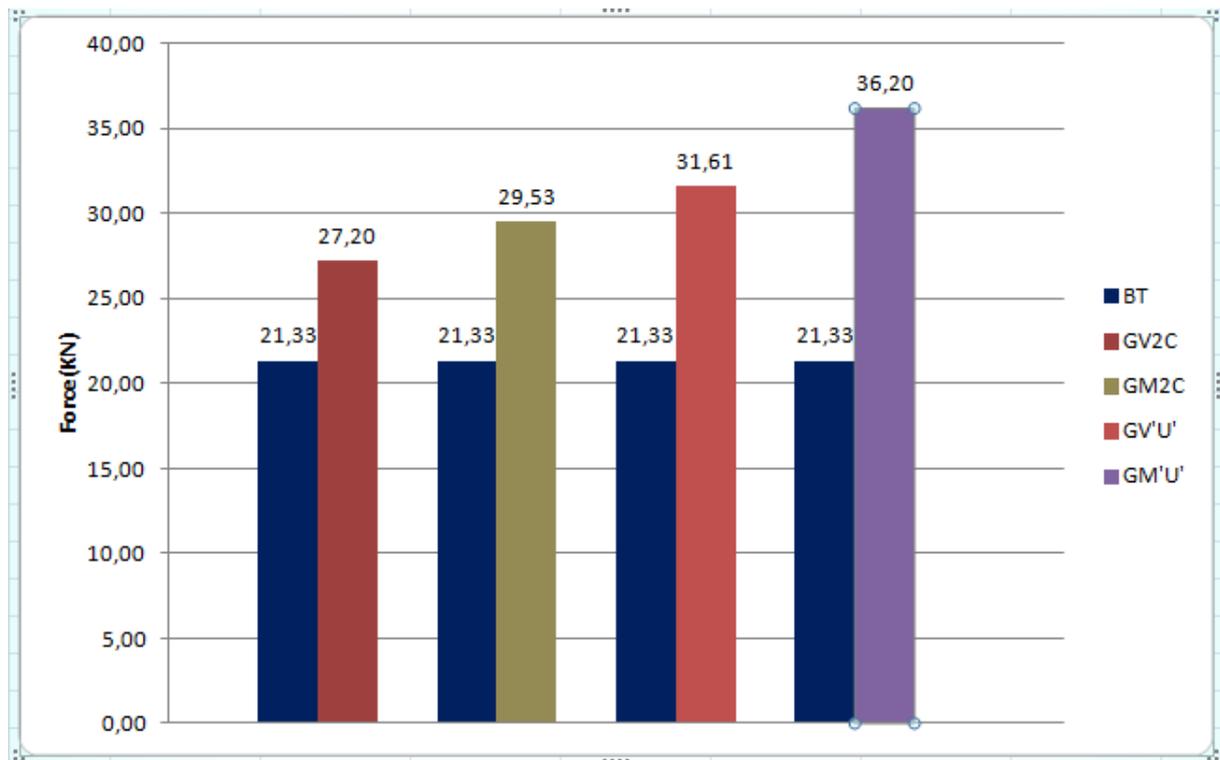


Figure V.17 : comparaison des charges ultimes entre GV2C/GM2C et GM'U'/GV'U' par rapport au témoin.

Interprétation :

Les résultats obtenus montrent que la charge des poutres renforcées en TRM'U' des grilles en fibre de verre est supérieure à celle des poutres renforcées avec le même type de grille collé par deux couches de mortier (GV2C) et elle est d'une différence de 4,5 kN d'ordre de 14% de gain.

D'un autre côté, les poutres TRM'U' des grilles métalliques est supérieure à celle des grilles métalliques renforcées uniquement au niveau de la surface tendue, cette différence est 7 kN d'ordre de 18%.

D'après les résultats obtenus qui montrent que la technique de renforcement par collage des TRM sur la surface tendue et les surfaces latérales (jaquette) influence sur la résistance des poutres qui atteignent une force de (34 kN) en moyenne par rapport aux poutres renforcées sur les surfaces tendues ($F=28$ kN).

Cette amélioration donnée par les TRM'U' est due à la géométrie des TRM'U' (jaquette).

Chapitre V : résultats et discussion

V.3.3. les PRF avec les TRM selon leur type et géométrie:

Cette dernière partie vient d'après les comparaisons précédentes où on a trouvé que les PRF et les TRM'U' qui donnent des résultats efficaces par rapport aux autres types de renforcement en matériaux composites.

La comparaison résultante entre ces deux types (PRF et TRM'U') est présentée dans les figures (V.23) et (V.24).

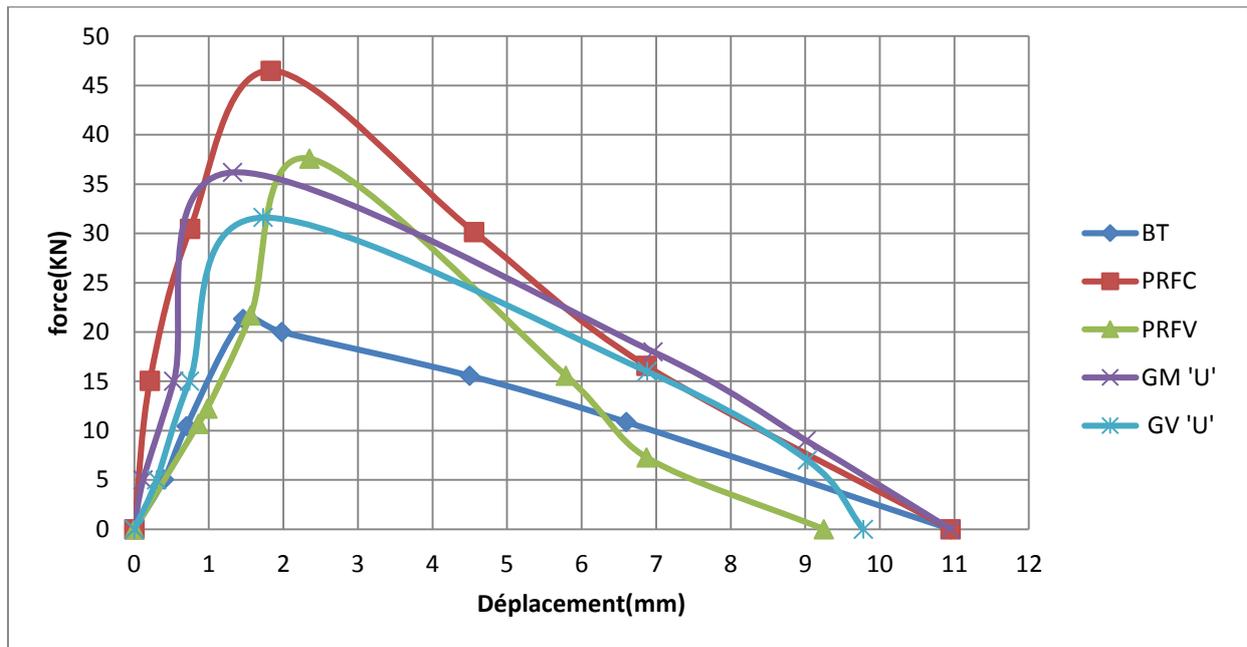


Figure V.18: courbe comparative entre PRF et TRM'U'

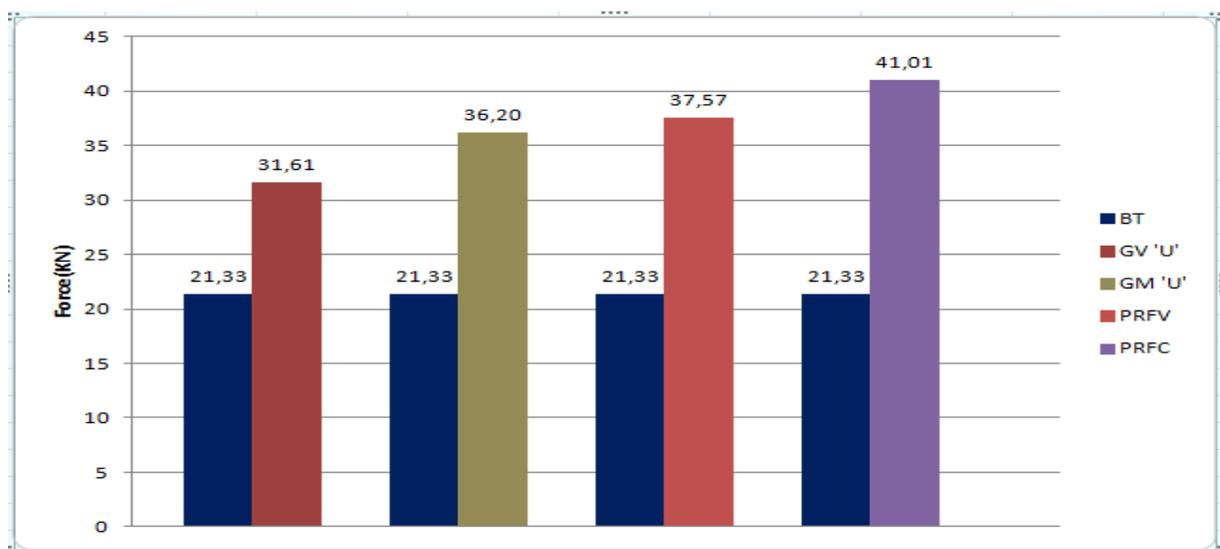


Figure V.19 : comparaison des charges ultimes entre GM'U'/GV'U' et les PRF par rapport au témoin.

Chapitre V : résultats et discussion

Interprétations :

La charge obtenue par les PRFC ($F=41,01\text{KN}$) est supérieure à celle obtenue par les TRM'U' de grille métallique ($F=36,2\text{KN}$) avec une différence un peu remarquable jusqu'à 10% de gain, malgré que les TRM'U' sont renforcées de plus face au cisaillement.

La charge obtenue par les PRFV ($F=37,57\text{KN}$) est supérieure à celle obtenue par les TRM'U' de gille en fibre de verre ($F=31,61\text{KN}$) avec une différence un peu remarquable (6KN) d'ordre 15% de gain.

Du point de vue déplacement (flèche) d'après les résultats obtenus montre que les PRF résistent mieux que les TRM'U' et elle est de l'ordre de 30% de gain à la moyenne.

V.4. Mode de rupture des poutres :

Un certain nombre de modes de rupture ont été observé pour des éprouvettes prismatiques en béton ordinaire renforcés avec des PRF et TRM en soffite dans de nombreuses études expérimentales déjà réalisées (par exemple Ritchie et al. 1991, Saadatmanesh et Ehsani 1991), sont comme suit :

- Défaillance flexionnelle par rupture de PRF et TRM.
- Rupture par cisaillement.
- Séparation du béton d'enrobage.
- Décollement de l'interface des extrémités de la plaque PRF.
- Décollement de l'interface par déclenchement de fissures intermédiaires flexionnelles et de cisaillement.

Dans notre étude, en générale les modes de ruptures observés sont :

A. Rupture de béton témoin (BT) :

Le mode de rupture observé pour les éprouvettes non renforcées est celui du mode de rupture typique de béton soumis à la flexion, c'est la rupture caractéristique du béton en flexion.

Chapitre V : résultats et discussion



Figure V.20 : Mode de rupture de béton témoin (non renforcé)

B. rupture des poutres renforcées PRF :



Figure V.21 : Mode de rupture des PRF

La rupture observée est une rupture par décollage de l'extrémité de la plaque des PRF, Ce mode de rupture est observé pour les éprouvettes renforcées par un renfort hybride, il est expliqué de façon que les fissures obliques commencent aux extrémités de la plaque et tend à décoller ces dernières suite à une mauvaise adhérence.

Chapitre V : résultats et discussion

C. Rupture des poutres renforcées par des TRM :



FigureV.22 : mode de rupture des TRM

La rupture observées par le renforcement en TRM était le découpage complet des grilles (verres et métaliques) suivi d'une fracture de béton en deux moitiés dans le sens vertical pour toutes les poutres renforcées par cette technique.

Chapitre V : résultats et discussion

V.5. Conclusion

La nécessité de renforcement par les PRF et TRM est très importante et efficace dans le cas où le béton présente une faible résistance par rapport un béton de grand résistance

Dans tous différents types de renforcement soit en PRF ou bien par TRM les poutres présentent un comportement meilleur par rapport aux poutres de références (BT), un gain de charge varie d'un type à un autre d'où on a trouvé que les PRF améliorent fortement la résistance mécanique de béton vis-à-vis les moments fléchissant (flèche excellente).

Le renforcement en TRM dépend beaucoup plus du nombre de couche des grilles et mortier appliquées en même temps

La géométrie ou la forme des grilles dans le cas de renforcement en TRM joue un rôle important pour l'amélioration de résistance vis-à-vis l'effort tranchant, donc le type de grille utilisée n'est pas un facteur essentiel pour le renforcement ou la réparation des poutres en béton par cette technique.

Le renforcement en PRF donne des résultats mieux que la technique TRM coté résistance à la flexion et facilité de mise en œuvre mais aussi des inconvénients du point de vue résistance thermique qui est faible en cas d'incendie ainsi que son prix (coût) élevé, pour cela la technique TRM est préférable dans les zones qui présentent des dangers et des risques d'incendie à des températures élevées et de coté économique.

Chapitre V : résultats et discussion

Conclusion générale :

Dans le cadre d'une étude visant le renforcement des systèmes structurants en béton , une investigation expérimentale a été conduite afin d'étudier le comportement des poutre en béton renforcés par des matériaux composites PRF de tissu en fibres de verre et carbone, et des TRM de grille métallique et de fibres de verre.

L'objectif principal visé à travers cette étude est l'obtention d'un modèle typique de renforcement des poutres pour augmenter et améliorer la résistance à la flexion des poutres. A cet égard un ensemble de vingt-sept poutres (15*15) cm² de section et 60cm de longueur en ont été testées sous un chargement statique par l'essai de flexion trois-points.

Sur la base des résultats de cette étude il est possible de mettre en évidence les conclusions principales suivantes :

- L'efficacité de renforcement de béton à l'aide des **PRF** et **TRM** de point de vue résistance et déformation est très remarquable.
- Les éprouvettes renforcées par les **PRFC** et des **PRFV** présentes un gain important de charge par apport au béton témoin.
- le renforcement de béton par les **PRFC** et mieux que le renforcement par les **PRFV**.
- Les **PRF** représente un rapport Résistance/Poids élevé et aussi une installation facile et rapide qui permettent de réduire le coût de main d'œuvre.
- Le renforcement des poutres par les TRM présente un gain de charge important
- Les TRM donne des bons résultats à savoir le type et la géométrie et le nombre de couches des grilles utilisées.
- Le renforcement par les **TRM** représente des améliorations importantes coté résistance et durabilité et d'un autre coté il est économique.
- Pour le développement des résistances par les techniques TRM en joue beaucoup plus sur la géométrie (la forme) et l'épaisseur de renforcement vis-à-vis les sollicitations visées.

Enfin on peut dire que le renforcement des poutres, en utilisant des matériaux composites demeure un sujet d'intérêt, notamment au point e vue des méthodes de calcul et le dimensionnement, de même qu'au point de vue de l'évaluation de leur durabilité en service.

liste des figures

	Chapitre I	page
Figure I.1	Différents types de fissurations	04
Figure I.2	Différentes sollicitations provoquant les fissures	04
Figure I.3	Réaction alcalin granulats	05
Figure I.4	Réaction sulfatique interne	06
Figure I.5	Action des sels	06
Figure I.6	Eau et sols acide	07
Figure I.7	Attaque sulfatique	07
Figure I.8	Phénomène de carbonatation	09
Figure I.9	Action des chlorures	09
Figure I.10	Fissuration de béton et éclatement	12

	Chapitre II	page
Figure II.1	Un tracé rectiligne d'une précontrainte	14
Figure II.2	Tracé polygonal d'une précontrainte	14
Figure II.3	Renforcement au moyen de béton projeté	16
Figure II.4	Renforcement de poteaux au moyen de profilés métallique	18
Figure II.5	confinements d'un poteau au moyen de PRF	19
Figure II.6	Une poutre en béton armé renforcée par une lamelle en PRF (Smith et Teng 2002)	23
Figure II.7	quatre types d'ancrage utilisés : (a), (b), (c), (d)	24
Figure II.8	renforcement des dalles par les PRF	25
Figure II.9	courbe comparatives de béton normal et béton confiné selon la norme NF EN 1992 -1.3	25
Figure II.10	assemblage poteaux-poutres	26

	Chapitre III	page
Figure III.1	Analyse granulométrique des granulats	32
Figure III.2	Tissu de fibre de carbone (Sika-Warp)	33
Figure III.3	Tissus en fibre de verre	34
Figure III.4	Les différents composants de sika-dur	35
Figure III.5	Produit sika-latex (5L)	36
Figure III.6	La fumée de silice	37
Figure III.7	Essai de traction par flexion	38
Figure III.8	Essai de compression	38
Figure III.9	Grille en fibre de verre	39
Figure III.10	Grilles métallique	39
Figure III.11	Eprouvettes testées	40
Figure III.12	Machine de traction zwick-Rowel	40
Figure III .13	Disposition des grilles sur la machine de traction	41

	Chapitre IV	page
Figure IV.1	les granulats (sable, gravier, ciment)	42
Figure IV.2	le malaxage	42
Figure IV.3	mise en place des poutres sur la table vibrante	43
Figure IV.4	les éprouvettes à l'état de repos à l'air libre	43
Figure IV.5	éprouvettes après démoulage.	43
Figure IV.6	les étapes de traitement de la surface des poutres	46
Figure IV.7	préparation des grilles	47
Figure IV.8	le mortier de réparation	47
Figure IV.9	les étapes de mis en place des grilles.	48
Figure IV.10	Application de deuxième couche en mortier sur les grilles	49
Figure IV.11	application de la couche de mortier sur la surface tendue et les surfaces latérales.	49
Figure IV.12	positionnement des grilles en fibre de verre et métalliques	50
Figure IV.13	application de 2ème couche de mortier sur le support	50
Figure IV.14	séchage des éprouvettes préparer a l'aire libre pendant 28 jours	50

Figure IV.15	découpage de fibre de carbone	51
Figure IV.16	mélange des composants A et B	52
Figure IV.17	application de la couche de colle sur la surface de béton	53
Figure IV.18	positionnement des matériaux composite (PRFV) et (PRFC)	53
Figure IV.19	marouflage des tissus	53
Figure IV.20	séchage des éprouvettes préparées à l'aire libre.	54

	Chapitre V	page
Figure V.1	essai de flexion 3 points	55
Figure V.2	schéma de disposition de la poutre sur la machine	55
Figure V.3	Courbe charge/déplacement des poutres témoins	56
Figure V.4	courbes correspondantes aux poutres renforcées en PRF	58
Figure V.5	comparaison des charges ultimes entre PRFV/PRFC par rapport au témoin.	58
Figure V.6	courbes correspondantes aux poutres renforcées par les grilles en verre (TRM)	60
Figure V.7	comparaison des charges ultimes entre GV1C/GV2C par rapport au témoin.	60
Figure V.8	courbes correspondantes aux poutres renforcées en TRM de grilles métalliques	62
Figure V.9	comparaison des charges ultimes entre GM1C/GM2C par rapport au témoin	62
Figure V.10	courbes correspondantes aux poutres renforcées en TRM de grille en fibre de verre et de grille métallique forme 'U'	64
Figure V.11	comparaison des charges ultimes entre GV'U'/GM'U' par rapport au témoin.	64
Figure V.12	courbes correspondantes aux charges ultimes entre GMV2C/GM2C par rapport au témoin	65
Figure V.13	comparaison des charges ultimes entre GMV2C/GM2C par rapport au témoin.	66
Figure V.14	comparaison des charges ultimes entre GM1C/GM2C et les PRF par rapport au témoin.	67
Figure V.15	comparaison des charges ultimes entre G2CC/GM2C et le PRF par rapport au témoin	67

Figure V.16	courbe comparatif entre les TRM (GV2C/GV2M) avec le béton témoin	68
Figure V.17	comparaison des charges ultimes entre GV2C/GM2C et GM'U'/GV'U' par rapport au témoin.	69
Figure V.18	courbe comparative entre PRF et TRM'U'	70
Figure V.19	comparaison des charges ultimes entre GM'U'/GV'U' et les PRF par rapport au témoin.	70
Figure V.20	Mode de rupture de béton témoin (non renforcé)	72
Figure V.21	Mode de rupture des PRF	72
Figure V.22	mode de rupture des TRM	73

Liste des tableaux

	Chapitre II	page
Tableau II.1	Comparaison qualitatives entre les fibres	21

	Chapitre III	page
Tableau III.1	caractéristiques physiques de ciment	29
Tableau III.2	caractéristiques chimiques de ciment	29
Tableau III.3	caractéristiques minéralogique de ciment	29
Tableau III.4	caractéristiques physico-chimique de gravier	30
Tableau III.5	Les propriétés physico-chimiques de sable	30
Tableau III.6	analyse granulométrique de Sable (0/3)	30
Tableau III.7	analyse granulométrique de gravier (3/8)	31
Tableau III.8	analyse granulométrique de gravier (8/15)	31
Tableau III.9	composition de béton	33
Tableau III.10	propriétés de béton	33
Tableau III.11	caractéristique mécaniques de fibre de carbone	34
Tableau III.12	caractéristique mécaniques de fibre de verre	34
Tableau III.13	caractéristiques générales de la résine Sika-dur-330	35
Tableau III.14	La formulation de mortier	36
Tableau III.15	résistance à la compression de mortier à 7 et 28 jours	38
Tableau III.16	résistance à la traction par flexion de mortier à 7 jours	38
Tableau III.17	caractéristiques mécaniques de grilles utilisées	41

	Chapitre IV	page
Tableau IV.1	Aperçu des neuf variantes	45

	Chapitre V	page
Tableau V.1	Résultats d'essai de flexion 3 points des poutres témoins	56
Tableau V.2	Résultats d'essai de flexion des poutres renforcées en PRF	57
Tableau V.3	résultats d'essai de flexion des poutres renforcées en grilles de fibre de verre (TRM)	59
Tableau V.4	résultats d'essai de flexion des poutres renforcées par les grilles métalliques	61
Tableau V.5	résultats de flexion des poutres renforcées par grille en fibre de verre et en grille métallique sous forme 'U' (jaquette)	63

Bibliographie et références

- [1] **Hicham BELHANNACHI** « réhabilitation et renforcement des poteaux en béton armé » mémoire de magister Université Mentouri Constantine juillet 2009
- [2] document pathologies de beton, COMPANIE DES EXPERT. Du bâtiment et travaux publics et de l'industrie formation du 7 Novembre 2016
- [3] Perfectionnement sur les techniques de réhabilitation et de renforcement des structures, rencontres scientifiques, SOCOTEC-CTC année 2002.
- [4] **A.PLUMIER**, pathologie et réparations structurelles des constructions, ArGenCo, édition 2006.
- [5] **C.BATHIAS**, matériaux composites, édition DUNOD, année 2005.
- [6] Document scientifique et techniques AFGC, réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites, année 2007
- [7] **Djadi MOHAMED** « renforcement du béton ordinaire à la compression par des matériaux composite hybride » thèse de diplôme de magister Université de boumerdes 2015.
- [8] **J.V.MIRANDA**, techniques et systèmes de renfort des structures en béton 2004.
- [9] **Ait Tafa ABDERRAHMAN** « réparation des poutres en béton armé endommagé à l'aide des matériaux composites » mémoire de magister Université de boumerdes 2015.
- [10] **R.Bendaïd, H.Mesbah, N.Chikh** « les matériaux composites (PRF) pour le confinement externe du béton. Livre (version – 30 juin 2003).
- [11] **Philippe Duquette** « renforcement en flexion de poutre en béton armé l'aide plaque en matériaux composite réalisé in-situ » mémoire de fin d'études magister Université de Laval Février 1998.
- [12] **SIKA ELDJAZAIRE 2016** « fiche technique de **sikadure-330** » 2016
- [13] **Nebbou Mohamed and Madani AMAR** « influence de la poudre de marbre sur les propriétés du béton » mémoire de magister Université de boumerdes 2007/2008
- [14] **Aymen ANIS** « le béton : durabilité, solution et innovation » 4^{ème} séminaire sur les technologies de béton Hôtel .Hilton-Alger 20 /21 octobre

[15] Règlement eurocode8. Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance au séisme et document d'application nationale AFNOR 2000.

[16] **FICHE TECHNIQUE DE CIMENT CHAMIL**

[17] **Jean LUKX 2009** « composites à fibre de carbone dans le génie civil » article **C5 440**.

[18] **Boussaha, FATAH 2008** « comportement en fatigue de poutre en béton armé renforcé en cisaillement à l'aide de matériaux composites » thèse doctorat 2007.

[19] Technical recommendations construction, guide for the design and construction of externally-bonded, FRP system for strengthening existing structure, CNR 2004

[20] **MOSLEY W.H, HULSE R, BUNGEY J.H.** «Reinforced concrete design to Eurocode 2». Eurocode 2. EDITIONS ROWE LTD CHIPPENHAM WILTS. Londres. Grande-Bretagne (1996).

[21] **Tania CROSTON 2006** «études expérimentale du comportement d'une poutre en béton armé en flexion 3 point réparé par matériaux composite » thèse doctorat Ecole Nationale supérieure d'Art et métiers centre de bordeaux

[22] **Dreux G.** « composition des bétons » réf. C220. 10/5/1982

[23] **site internet** « <http://www.ba-cortex.com/pages/cours/materiaux/a1.5-modelisation-du-beton.php> »

[24] **thèse Master** « renforcement du béton ordinaire soumis à la compression par des matériaux composites hybrides »