

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Des Matériaux



Mémoire De Fin D'études

En Vue De L'obtention Du Diplôme De Master

Filière : Science et Génie des matériaux

Option: Sciences des Matériaux pour Construction durable

Thème :

**Réparation des poutres en béton armé endommagées à
l'aide des matériaux composites hybrides**

Réalisé par : Mr: AIT TAFATI ABDERRAHMANE

Sujet proposé et Suivi par : GHERNOUTI YUCEF

Remerciement

Je commence par remercier le dieu tous puissant, de nous avoir donné le courage et l'optimisme de finir ce travail

Je voudrais saisir l'occasion qui m'est offerte pour exprimer ma profonde gratitude et tous mes remerciements à mon promoteur Dr YOUCEF GHERNOUTI Professeur à l'Université M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES pour, leur précieux conseils, leur critiques constructives et leur intérêt qu'il a porté toute au long de l'élaboration de ce travail.

J'adresse mon sincère remerciement à tous les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur d'examiner cette mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements aux membres de « laboratoire nationale de l'habitation et de la construction » «unité Oued Smar » pour leur aide pendant la durée du stage.

J'adresse mes sincères remerciements aux membres de « laboratoire de génie civil université UMMTO de tizi ouzou en particulier Mr BOUHERAOUA, pour leur aide pendant la durée du stage.

Merci aux étudiants de ma promotion, pour leurs aides et leurs soutiens durant toute la période de ma formation.

J'adresse mes sincère remerciement à l'ensemble des enseignants qui Je l'ai rencontré dans ma carrière.

Je rends un grand hommage à ma famille et belle famille, en particulier mes chers parents aux quels je dois ce que je suis, qui m'ont toujours soutenu et encouragé dans mes choix tans professionnels que privés, ainsi que mes chers frères

Enfin, je souhaite adresser mes remerciements à tous ceux qui par leur aide et leur soutien m'ont permis de réaliser cette étude

.

Résumé :

Une étude expérimentale du comportement de poutres courtes en béton armé pré-fissurées puis réparées par des matériaux composites hybrides à sous chargement quasi statique, a été menée par le biais d'essais de flexion 3 points. L'analyse a été faite par une étude expérimentale sur vingt quatre éléments en béton armé, en deux types de béton différentes pré-fissurés puis réparés par du tissu en fibre de carbone ou une combinaison des renforts composites (carbone, verre) collé sur la surface à l'aide d'une résine époxy. Afin d'étudier l'influence de réparation sur le comportement de ces poutres, six poutres (trois de chaque types de béton) ont été chargées jusqu'à la rupture sans être pré-fissurées ni réparées, et ont été comparées à dix huit poutre pré-fissurées et réparées par trois types de réparation différentes. Cette étude expérimentale a montré que la réparation par matériaux composites hybride améliore les performances mécaniques des poutres en béton armé en termes de capacité portante soit un gain de **20 à 56%** et de réduction des déformations avec une réduction de la flèche (**10 à 42%**).

Mots-clés : matériaux composites, pré-fissuré, l'essai de flexion, hybrides fibre, résine, flèche.

Abstract:

This thesis deals with the experimental study about the behaviours of short RC beams precracked and then strengthened with FRP Hybrid composites through the three-point bending tests under quasi static . The study was carried out through experimental and twenty eight elements of concrete armed, pre cracked then repaired by carbon Or a combination of composite reinforcements (carbon, glass), the fibre stuck in situ using an epoxy resin. In order to study the repair influence on the behavior of these beams, six beams (three of each type of concrete) were loaded to break without being pre-cracked or repaired and compared to eighteen beams Pre-cracked and repaired by three different types of repair. This experimental study has shown that repair by composite materials improves the mechanical performance of reinforced concrete beams in terms of bearing capacity, with a gain of 20 to 56% and reduction of the deformations with a reduction in the boom (10 to 42%).

Keywords: composite materials, pre-cracked, bending test, hybrid fiber, resin, boom.

يقدم هذا العمل دراسة تجريبية لروافد من الخرسانة المسلحة والمتصدعة مسبقا اثر تطبيق قوة عليها لها عن طريق الهجينة. الدراسة تمت عن طريق تجربة الانحناء ثلاثة نقاط هذا التحليل تجريبية وعشرين ألياف نوعين مختلفين والتي تم إصلاحها باستخدام مزيج التعزيزات) والتي تم إلصاقها على (الايوكسي). تأثير الإ هذه (شهادة سليمة ومن غير أي دعم خارجي تحميلها مقارنتها ثمانية من الروافد التي تم تصديعها من وإصلاحه عن طريق من مزج بين الألياف . وأظهرت هذه التجريبية نتائج مشجعة حيث تمكنت المواد الهجينة صة المزيج بين نوعين من تحسين الميكانيكي للروافد المسلحة حيث تحقيق (56-20) زيادة في قوة وتقليل (10 42).

الكلمات المفتاحية: ، الهجينة التصديع، مزيج من المركب، ، الألياف

Sommaire

Introduction général	1
Partie I : Recherche Bibliographique	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Désordres affectant les ouvrages	4
I.2.1.Dégradation des Matériaux	4
I.2.2.Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution	4
I.2.3. Modification des conditions d'exploitation ou d'utilisation des ouvrages.....	6
I.3.Comportement des poutres en béton armé	6
I.4.La réparation ou le renforcement des poutres.....	9
I.4.1. Caractéristiques des produits de renforcement.....	9
I.5.Techniques de renforcement classiques des éléments structuraux	11
I.5.1. Gainage (Chemisage)	11
I.5.2. Injection de résine dans les fissures	11
I.5.3. Béton projeté	11
I.5. 4. Précontrainte extérieure.....	12
I.5.5. Techniques de renforcement par placage des tôles d'acier	12
I.6.Techniques de renforcement par matériaux composites	13
I.6.1. Le collage externe (Externally-Bonded EB)	13
I.6.2.Définition de PRF.....	14
I.6.3.Méthode de renforcement par bar NSM "Near-surface mounted"	15
I.6.4Méthode de renforcement ETS "Embedded through-section"	17
I.7. Revue des travaux antérieurs sur la réparation ou le renforcement des poutres par matériaux composites PRF	18
I.8.Comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites	28
I.8.1 Mécanismes de rupture des poutres renforcées.....	28
I.8.2.Problème d'adhérence avec le béton.....	30
I.9. Application des renfort FRP.....	30
I.10. Conclusion	33

Partie II. Étude Expérimentale

II.1 : Introduction	36
II.2. Objectif de travail	36
II.3. Caractéristique des matériaux utilisés	37
II.3.1.Ciment.....	37
II.3.2.Les granulats :	38
II.3.2.1. Graviers	38
II.3.1.2.Sable	40
II.3.3.Adjuvant.....	43
II.3.4.Calcul de la composition de béton « Méthode de Dreux-Gorisse» :.....	43
II.3.5.Propriétés des bétons formulés	49
II.3.5.1.Bétons frais.....	49
II.3.5.2.Bétons durcis	50
II.3.6. Armatures.....	50
II.3.7.Matériaux de réparation	51
II.3.7.1.fibre de carbone	52
II.3.7.2.fibre de verre	52
II.3.7.3.La résine	53
II.3.7.4Caractéristiques du composite (tissu+ résine).....	53
II.4. Description des poutres testées	54
II.4.1. Procédure de mise en œuvre des poutres	54
II.5. Notation des poutres testées	55
II.6. Procédures d'essais (essai de flexion)	59
II.6. 2. Essai de flexion des poutres en bétons.....	60
II.6. 3.Pré-fissuration des poutres	61
II.7. Réparation des poutres	62
II.8. Résultats et discussion	67
II.8.1. Béton I.....	67
II.8.2.Comparaison des trois modes de réparation des poutres	71
II.8. 3.Courbe charge/flèche des poutres en béton II.....	73
II.8.4.Comparaison des trois modes de réparation des poutres en béton II.....	76
II.8.5.Comparaison entre les résultats de réparation des deux bétons	78
II.9.Conclusion	79

Conclusion générale 80

Liste des tableaux

Partie : I

Tableau I.1: les caractéristiques mécanique des fibres [5].....	14
Tableau I.2 : Configuration des poutres testées [15]	20
Tableau I.3: Désignation des poutres renforcées avant et après endommagement et mode de collage des différents composites [13]	21
Tableau I.4 :Détails des éprouvettes d'étude de Sihem Kermiche& Bachir Redjel [18].....	24

Partie : II

TableauII. 1: Caractéristique physique des deux ciments [27][28].....	41
Tableau II.2: Caractéristique mécanique du ciment [27][28].....	41
Tableau II.3:Analyses chimique du ciment [27][28].....	42
Tableau II.4:.Composition minéralogique du ciment [27][28].	42
Tableau II.5:caractéristique physico.-mécanique du gravier 8/15 et 3/8	42
Tableau II.6 :Analyse granulométrique de gravier 8/15 Selon la norme EN 933-1 □	43
Tableau II.7: Analyse granulométrique gravier de 3/8 □Selon la norme EN 933-1 □	43
Tableau II.8: Propriétés physico-chimiques	44
Tableau II.9:Analyse granulométrique de sable 0/3 « Selon la norme EN 933-1 ».....	45
Tableau II.10 : Analyse granulométrique de sable 0/1 □Selon la norme EN 933-1.....	45
Tableau II.11: Compositions des bétons	53
Tableau II.12: Affaissement de béton frais	53
Tableau II.13: Résistances à la compression et à la flexion.....	54
Tableau II.14: Propriétés mécaniques de l'acier[3].....	55
Tableau II.15:Caractéristique technique des tissus [25].....	56
Tableau II.16: Notation des poutres	61
Tableau II.17: résultats des essais de la première série d'essais de flexion	63
Tableau II.18: Valeurs de la charge de pré-fissuration	65
Tableau II.19 : Résultats des poutres réparées	82

Liste des figures

Partie : I

Figure I.1: Rupture en flexion (avec une compression de béton) [5].	6
Figure I.2-: Rupture en flexion[5].	6
Figure I.3: Rupture en cisaillement[5].	6
Figure I.4: Comportement de poutre béton armé simple (rupture en cisaillement)[5].	7
Figure I.5: Réparation de poutre par béton projeté [29]	11
Figure I.6: poutre armé renforcé à l'aide d'une plaque d'acier [9].	12
Figure I.7: Les différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques en composites [29].	14
Figure I.8: Types de barres composites (FRP) insérées avec la technique NSM [10]	15
Figure I.9: Technique de renforcement par la méthode NSM[5]	16
Figure I.10: les étapes de la méthode (ETS) [5]	17
Figure I.11: Courbes force-déformation des aciers pour poutres réparées et renforcées[13].	22
Figure I.12: Modes de renforcement des poutres courtes[16].	23
Figure I.13: Modes de renforcement des poutres d'étude de Sihem Kermiche & Bachir Redjel.[18]	25
Figure I.14: renforcement par la méthode SCR [20]	26
Figure I.15: Modes de ruine conventionnelle et précoce des poutres renforcées en flexion par technique de collage des tissus composites.[22].	28
Figure I.16: mode de rupture par décollement de tissu [5].	29
Figure I.17: Sakawagan Bridge au Japon (8 piles de 42 à 65 de hauteur et de 7 m de diamètre) : passerelle de mise en œuvre de la fibre de carbone[23]	30
Figure I.18: Pont de OUADE EL HARAC.	31
Figure I.19 : Réparation et renforcement des poutres de pont par matériaux composites [13]	31
Figure I.20: Hôtel AZZEMOUR-BEJAIA [24].	32
Figure I.21: Application de composite sur les poutres d'hôtel [24].	32

Partie :II

Figure II 1: courbe granulométrique	47
Figure II.2: Les courbes d'analyse granulaire par tamisage NF EN 933-1	50
Figure II.3: Essai au cône d'Abrams.....	53
Figure II.4: Mode d'essai : a) compression, b) traction par flexion	54
Figure II.5: ferrailage des poutres testées	55
Figure II.6: schéma de ferrailage de poutre	55
Figure II.7: tissu mono directionnelle (SikaWrap)	56
Figure II.8: Tissu toile de fibre de verre	57
Figure II.9: Sikadur ®330	58
Figure II.10: Préparation des spécimens	59
Figure II.11: Murissement des poutres dans des bacs.	59
Figure II.12: Configurations géométriques de réparation des poutres	61
Figure II.13 : Schéma de la disposition de la poutre sur la machine d'essai ..	63
Figure II.14: Machine d'essai de flexion (ELE. IBERTEST)	64
Figure II.15: Courbe charge-flèche des poutres témoins	64
Figure II.16: Poutre pré-fissurée	66
Figure II.17: la préparation de la surface de la poutre b).	67
Figure II.18: préparation de la résine:	68
Figure II.19: application de la première couche de colle sur la poutre.....	69
Figure II.20: l'emplacement de tissu SikaWrap HEX 230 C sur la poutre	69
Figure II.21: positionnement de fibre de verre sur la poutre	70
Figure II.22: application de fibre de verre ® sur la poutre	70
Figure II.23 : Comparaison des courbes force / flèche entre la poutre réparée (P1C).....	72
Figure II.24: rupture de poutre (P1C) par cisaillement.....	72
Figure II.25: Comparaison des courbes force / flèche entre poutre réparée (P1CVD).....	73
Figure II.26: mode de rupture de poutre (P1CVD) arrachement des bandes puis rupture par cisaillement	73
Figure II.27 : Comparaison des courbes force / flèche entre poutre réparée (P1CVI)	74
Figure II.28: Mode de rupture des poutres (P1CVI) Décollement de la résine du tissu et rupture par cisaillement.....	74
Figure II.29: courbe de comparaison charge/flèche entre les 3 types de réparation (P1C, P1CVD, P1CVI) et la poutre témoin (PT1).....	76
Figure II.30: Comparaison des forces ultimes de poutres réparées avec la poutre témoin de béton I.....	77
Figure II.31: comparaison des flèches à la charge ultime de poutres réparées avec la flèche de poutre témoin béton I.....	77

Figure II.32: Comparaison des courbe force / flèche entre poutre réparé(P2C)	78
Figure II.33: poutre (P2C) compression de béton, délaminage de la bonde et rupture par cisaillement	78
Figure II.34: Comparaison des courbe force / flèche entre poutre réparé(P2CVD)).	79
Figure II.35 : Poutre P2CVD décollement du bonde GFRP puis rupture par cisaillement Série 3 (P2CVI).....	79
Figure II.36: Comparaison des courbe force / flèche entre poutre réparé(P2CVI) et poutre témoin (PT2).	80
Figure II.37: mode de rupture de poutre (P2CVI) par cisaillement décollement de composite.....	80
Figure II.38: courbe de comparaison charge/flèche entre les 3 types de réparation (P2C, P2CVD, P2CVI) et la poutre témoin (PT2).....	81
Figure II.39: comparaison des forces ultimes des poutres réparées par rapport à la poutre témoin (Béton II).....	82
Figure II.40 : comparaison des flèches à la charge ultime de poutres réparées avec la flèche de poutre témoin béton II	82

Introduction général

Dans le domaine de la construction, le béton armé est un matériau le plus couramment utilisé pour construire des bâtiments, des ponts...etc.

Avec sa grande histoire, il y a un très grand nombre d'ouvrages qui se retrouve dégradé pour de multiples raisons tels que les accidents routiers, l'évolution de trafic, les modifications de chargement dans les bâtiments ou les actions climatiques. Les ouvrages en béton armé peuvent être endommagés durant leur durée de vie par vieillissement des matériaux ou par modification des conditions d'exploitation

La durabilité est définie par la norme NF X 50-501 (durée de vie et durabilité des biens) comme « l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état-limite soit atteint ». [1]

Une enquête menée par le CTTP en 2003 [2] a montré que 44% des ouvrages d'art présentent des désordres qui nécessitent des travaux de confortement. Après le séisme du 21 Mai 2003, 86106 bâtiments ont été endommagés dans la Wilaya d'Alger uniquement. Ceci montre le nombre élevé d'ouvrages devant être réhabilités.

Pour résoudre ces problèmes, deux possibilités principales s'offrent aux maitres d'ouvrage : la reconstruction ou la réparation.

La reconstruction est une solution intéressante mais coûte très cher et ne peut pas être appliquée pour tous les ouvrages (ouvrages historiques ...) La deuxième solution est donc souvent utilisée pour maintenir les ouvrages dans un bon état de service.

Une des méthodes de réparation couramment utilisée, la technique de renforcement externe de structure en béton armé est une technique utilisée pour réhabiliter ou augmenter la résistance des structures en béton armé (BA) lorsque celles-ci présentent des dégradations de matériaux, des défauts de conception ou bien exécution ou lorsque le chargement actuel demande une structure plus résistance pour la sécurité. Le principe de cette technique est le remplacement des matériaux dégradés et/ou l'ajout de nouveaux matériaux, d'utiliser des matériaux beaucoup plus performants que la section de structure initiale, d'augmenter la section de structure par l'ajout de matériau (béton...). La technique a recours le plus souvent à l'utilisation des aciers en tant que renforts externes passifs ou actifs qui présentent des avantages comme une haute performance mais présentent aussi des inconvénients : corrosion,

poids élevé, adaptation difficile vis-à-vis des sections complexes de structure. C'est pourquoi l'utilisation de matériaux composites devient un moyen intéressant en remplacement de l'acier dans le renforcement des structures en béton armé. Ces matériaux présentent un bon potentiel de facilité d'adaptation à n'importe quelle section de structure donc une mise en œuvre très facile grâce à leur faible poids, leur haute performance en traction, anticorrosion.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier le comportement sous un chargement de flexion des poutres en béton armé endommagées puis réparées par le collage externe des matériaux composites à base de fibres de carbone et fibres de verre (renforcement hybride). Les paramètres d'études sont la classe de béton et la configuration de renforcement en flexion et en cisaillement.

Cette mémoire est constituée de deux parties :

La première partie constitue une synthèse bibliographique sur les causes de dégradation des constructions en béton armé, le comportement des poutres en béton armé ainsi que les techniques de renforcement et de réparation des poutres en béton armé. Un résumé de quelques travaux expérimentaux réalisés par plusieurs chercheurs sur les poutres réparées ou renforcées à l'aide de matériaux composites.

La deuxième partie est totalement dédiée à l'étude expérimentale. Les démarches réalisées et les protocoles expérimentaux suivis sont exposés, les étapes de formulation, la confection et l'élaboration des corps d'épreuve, leur procédé de pré-fissuration et leur réparation par les différentes configurations. Les résultats expérimentaux en terme de courbes force-déplacement et le mode de rupture des bétons réparés obtenus dans le cadre de cette étude et leurs discussions seront présentés.

Enfin, ce travail est terminé par une conclusion générale où sont rappelées les principales résultats obtenus.

PARTIE I

I.1. Introduction

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

I.2. Désordres affectant les ouvrages

I.2.1. Dégradation des Matériaux

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

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

I.2.2. Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution

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

Dans le premier cas, les causes de fissuration et de dégradation sont dues à des hypothèses erronées au niveau des conditions de chargement, d'environnement, ou de fonctionnement de l'ouvrage. Ces erreurs sont à l'origine, généralement, d'un mauvais dimensionnement des sections ou d'une disposition non satisfaisante des armatures qui se traduisent par des localisations de fissures ou des ruptures non acceptables. Parmi les conditions particulièrement mal évaluées, il est possible de faire état de l'action des gradients de température sur un ouvrage, de la mauvaise estimation des efforts de précontrainte due à des erreurs de tracé mais aussi à des données erronées sur la relaxation des câbles et sur leur interaction avec la structure (frottement). Un mauvais dimensionnement des cadres et de leur espacement pour reprendre les efforts tranchants en béton armé est à l'origine de fissurations des ouvrages qui nécessitent une réhabilitation immédiate. [3]

Les erreurs d'exécution qui sont susceptibles de justifier une intervention au niveau de l'ouvrage portent sur les imperfections de coffrage, les défauts de bétonnage, les incohérences du ferrailage ou sur les conditions non satisfaisantes de décoffrage

Des enquêtes statistiques menées par le bureau Sécurité de la SOCOTEC en France sur 2979 dossiers de structures en béton ont montré que le nombre total de sinistres dus à des erreurs de conception ou d'exécution est comme suit [4]:

- **Erreurs de conception**

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

- **Erreurs de calcul (étude)**

- Erreurs dans les hypothèses de calcul.
- Erreurs dans l'introduction des données dans un calcul automatique.
- Absence d'études.
- Mauvaise utilisation des règlements.
- Non vérification des états de service (déformations).
- Dessins incomplet ou insuffisant.

- **Erreurs d'exécution et de réalisation**

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

I.2.3. Modification des conditions d'exploitation ou d'utilisation des ouvrages

En fonction de l'évolution du trafic, ou la modification des charges réglementaires sur essieux, ou de la voirie, il est possible de justifier la nécessité de renforcer ou d'améliorer la

portance d'un ouvrage. En plus les ponts et bâtiments sont appelés à être mis en conformité vis-à-vis des sollicitations sismiques ou vis-à-vis de sollicitations accidentelles telles que l'impact de véhicules.[3]

I.3.Comportement des poutres en béton armé

Lorsque les poutres en béton armé sont sollicitées, plusieurs types de fissures peuvent apparaître. Des fissures horizontales situées dans la zone comprimée de la poutre ou des fissures verticales peuvent apparaître dans la zone de traction (Figure I.1). Ces types de fissuration apparaissent en général dans les cas de rupture en flexion. Une fissuration inclinée de traction synonyme de fissure de cisaillement traduit une rupture des poutres par cisaillement (Figure I-1).

La rupture d'une poutre en béton armé est atteinte lorsque les charges qui la sollicitent excèdent sa résistance. Le mode de rupture dépend de plusieurs paramètres

- Le type de chargement;
- les dimensions de la poutre et la géométrie de la section;
- les propriétés mécaniques des matériaux et leurs taux.

La variation de ces paramètres implique une variation dans le comportement d'une poutre dans le cas ultime, de son mode de rupture. [8]

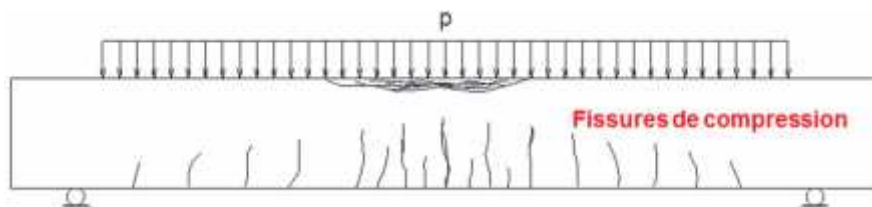


Figure I.1 : Rupture en flexion (avec une compression de béton) [5].

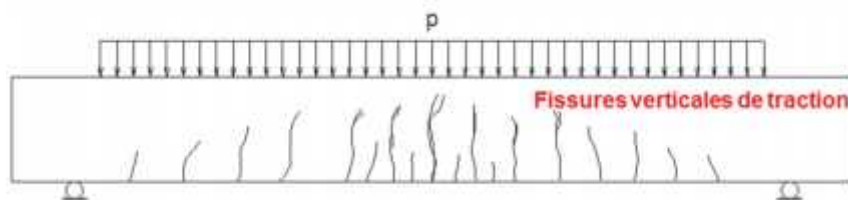


Figure I.2 -: Rupture en flexion [5].

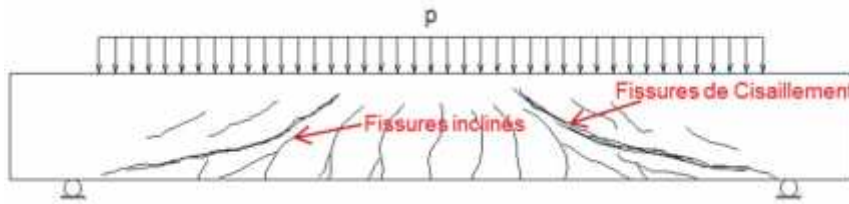


Figure I.3: Rupture en cisaillement [5].

En généralement, la rupture en flexion de poutre BA est assez ductile, les fissures verticales se propagent sur le long de l'axe de poutre jusqu'à la ruine soit par la rupture de l'acier en traction soit par écrasement du béton en compression. Dans le cas d'une rupture en cisaillement, le comportement de la poutre est très fragile. Dès que les fissures diagonales apparaissent, la poutre rompt brutalement.

Le comportement en cisaillement d'une poutre en béton armé et les modes de rupture qui s'y produisent sont intimement liés au rapport a/d . [6]

Dans le cas de rupture en cisaillement, le comportement de la poutre peut être divisé en 3 phases

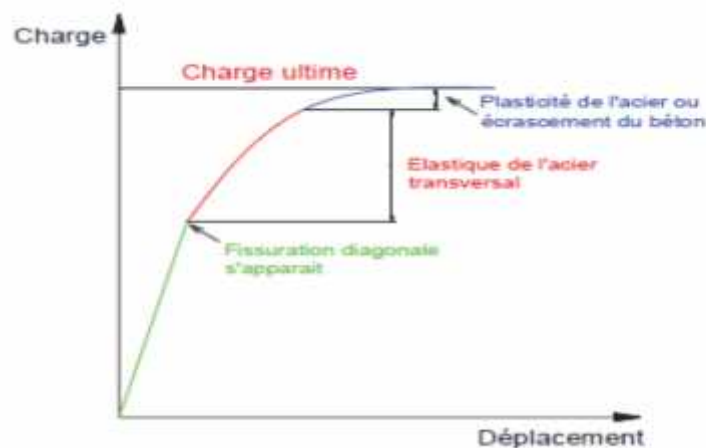


Figure I.4: Comportement de poutre béton armé simple (rupture en cisaillement)[5]

Phase 1 :

Dans la première phase, la poutre présente un comportement quasi-élastique. Dans cette phase, les fissures verticales peuvent apparaître dans la zone proche de l'appui, il n'y a pas encore de fissures diagonales, le béton dans cette zone travaille encore dans le domaine élastique et les efforts dans l'acier transversal sont négligeables. L'effort tranchant dans la section est supporté totalement par le béton.

Phase 2 :

La seconde phase commence quand la fissure diagonale apparaît à côté de l'appui. Une part de l'effort tranchant dans la section est reprise par les aciers transversaux qui coupent les fissures diagonales.

Dans cette phase la contrainte dans les aciers transversaux reste encore en phase élastique. L'autre part de l'effort tranchant est reprise à la fois par le béton en compression, le frottement entre les granulats dans la zone de fissuration (effet interlock) et la partie de l'acier longitudinal qui coupe la fissure diagonale (effet dowel).

Phase 3 :

Dans cette phase, la rupture apparaît à cause de la propagation de plasticité dans l'acier transversal ou l'écrasement de la bielle de béton en compression. Cette phase est très courte, après la charge ultime, une chute de charge très soudaine apparaît avec, peut être une explosion dans la zone de béton en compression [5]

Il faut dire que le comportement en cisaillement des poutres en béton armé, à lui seul, est déjà complexe: une foule de paramètres, souvent interdépendants, influencent ce comportement (type de poutre, taux d'acier longitudinal, taille des poutres, effort axial, ... etc.); de nombreux mécanismes s'y côtoient; différents modes de rupture y sont observés. Si bien que le problème du cisaillement,

Dans une poutre en béton armé, on distingue, en général, deux types de fissures :

Verticales et obliques. Les fissures verticales, dues à la flexion, se forment les premières et apparaissent là où la contrainte de flexion est maximale. Les fissures obliques apparaissent au voisinage des extrémités de la poutre et sont dues au cisaillement et à la flexion, agissant simultanément. Des fissures obliques peuvent aussi apparaître dans l'âme lorsque celle-ci est mince et que le rapport de la longueur de cisaillement (a) sur la hauteur utile de la section (d) est réduit.[6].

I.4. La réparation ou le renforcement des poutres

La réparation d'une construction est une opération qui consiste à lui restituer, par des travaux appropriés, un niveau de service perdu. La baisse du niveau de service peut résulter de toutes sortes de causes ; les plus fréquentes sont la dégradation progressive des propriétés des matériaux (agressions atmosphériques, modification des propriétés des matériaux,...),

l'utilisation intensive (effet de la répétition des charges) voire abusive (utilisation au-delà des charges prévues), les accidents et sinistres (chocs, incendies, séisme etc...) [6].

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

Le choix des méthodes de confortement doit satisfaire les objectifs suivants:

- L'utilisation optimale des structures principales avec un minimum de travaux de confortement.
- Le minimum de travaux isolés (ponctuels) pour éviter un coût élevé du confortement.
- Une interruption minimale du processus d'exploitation pendant le confortement.
- Une mécanisation optimale et une technologie d'exécution élevée.

Le renforcement des ouvrages par des matériaux composites constitue une solution moderne surtout dans les zones soumises aux actions sismiques importantes. Les avantages des matériaux composites se caractérisent par une grande résistance, une aptitude au façonnage, un faible poids propre et une réalisation facile [3].

La technique de renforcement en flexion par matériaux composites est largement appliquée dans le génie civil. C'est une des méthodes efficaces pour renforcer et réparer la structure sans changer la taille de cette structure. Les résultats expérimentaux montrent clairement que le renforcement par composite modifie essentiellement la deuxième partie de la relation moment-courbure et permet d'augmenter le moment ultime de 50 à 200% selon la technologie d'application des composites, et selon le pourcentage de l'acier présenté dans la section [5].

I.4.1. Caractéristiques des produits de 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

- comme tout béton réalisé selon les règles de l'art, les produits de réparation ou de renforcement doivent présenter une bonne tenue vis-à-vis des agents agressifs:

-la résistance à la carbonatation, c'est-à-dire à la pénétration du gaz carbonique contenu dans l'air qui, lorsqu'il entrera en contact avec les armatures, provoquera leur corrosion. Cette caractéristique est étroitement liée, outre à l'aspect formulation du produit de renforcement, à la qualité de sa mise en œuvre, et à la mise en place.

-La résistance aux sulfates apportés soit par l'eau de mer, soit par l'eau présente dans des sols riches en gypse, ou par le sel de déverglaçage utilisé en hiver, dans un milieu alcalin comme le béton, la présence de sulfates provoque la formation d'hydrates expansifs(Ettringite) entraînant, à terme, la ruine du béton il faut tenir compte de cet élément pour la formulation du produit de renforcement fabriqué en usine ou sur chantier, en choisissant les ciments adaptés.

-La résistance aux chlorures apportés essentiellement par l'eau de mer, et le sel de déverglaçage, les chlorures migrant dans le béton se transforment en acide chlorhydrique provoquant la corrosion des armatures.

-La résistance aux cycles de gel et dégel, est indispensable, ainsi pour de tels produits de renforcement à base de liant hydraulique, une exigence d'un entraîneur d'air s'avère nécessaire [21].

I5. Techniques de renforcement classiques des éléments structuraux

I.5.1. Gainage (Chemisage)

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

Les travaux de préparation des surfaces avant l'opération de gainage revêtent une importance primordiale. Le coffrage de la gaine doit être muni de cales d'espacement destinés à prévoir un vide entre le coffrage même et la surface du béton ou matériau initial. Ce coffrage peut être temporaire ou permanent. Il peut être en bois, en acier ou en béton préfabriqué, selon sa destination et les conditions d'exploitation [3].

I.5.2. Injection de résine dans les fissures

Les éléments en béton, endommagés dont les fissures sont stables et qui ont une largeur comprise entre 0.2 mm et 2 mm peuvent être réparés par la technique d'injection de résine. Il est bien entendu que le béton des zones fissurées n'est ni disloqué ni écrasé. Les éléments dont les fissures dépassent 2 mm de large peuvent être réparés par injection de mortier époxydique. Les travaux d'injection se font en deux étapes : la préparation des fissures, et l'injection proprement dite [3].

I.5.3. Béton projeté

Les bétons transportés 'secs' ou 'mouillés' dans une conduite desservant les différentes parties d'un ouvrage à réparer, sont appelés bétons projetés lorsque, grâce à l'utilisation d'air comprimé, ils peuvent être mis en place par projection (Figure.I.5).

Cette technique est employée par deux méthodes pour la projection du béton, il s'agit de la voie sèche et de la voie mouillée [4]

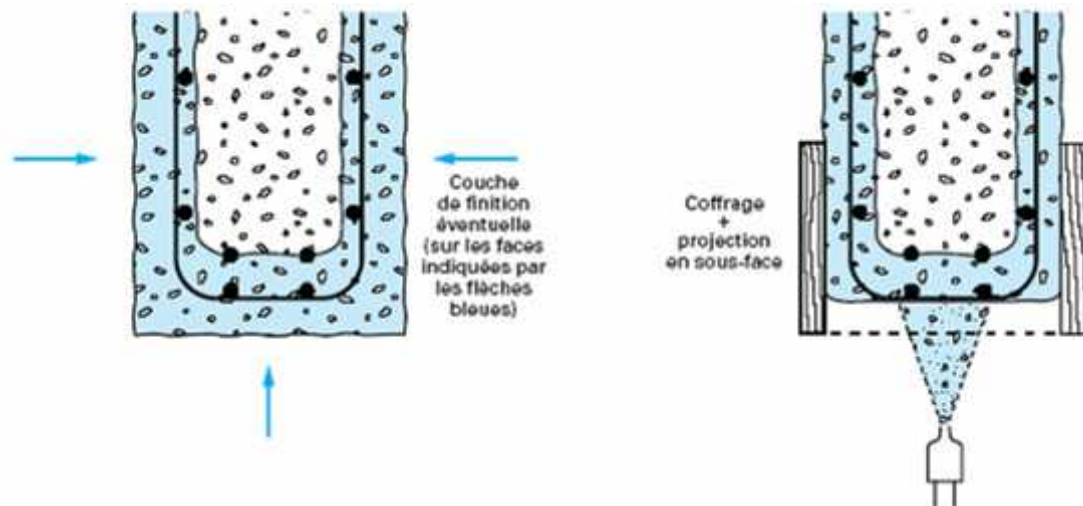


Figure 1.5 : Réparation de poutre par béton projeté [29]

I.5.4. Précontrainte extérieure

Cette technique permet la mise en œuvre et la conservation d'efforts de précontrainte appliqués à des ouvrages existants précontraints ou non dans le but de leur redonner l'état de service initial ou de leur donner un nouvel état de service [3].

I.5.5. Techniques de renforcement par placage des tôles d'acier

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

Swamy et al. (1987) ont réalisé la première évaluation systématique des effets des différents paramètres influençant le comportement structural des poutres renforcées avec plaques collées en acier. Leur programme expérimental consistait en l'étude de 24 poutres en béton armé (155 mm x 255 mm x 2300 mm, $f_b = 36$ MPa; $A_s = 3M20$, $f_s = 470$ MPa; $s = 75$ mm) dotées de différents types de renforcement (variation de l'épaisseur de la plaque et de la couche de colle, pré-chargement). Dans tous les essais, la plaque mesurait 2200 mm de long et 125 mm de large l'épaisseur variait entre 1.5 et 6 mm.

Les propriétés de l'acier utilisé pour les plaques étaient $f_y = 250$ MPa et $f_{su} = 310$ MPa. Sur les 24 poutres étudiées, 13 ont subi une rupture par délaminage, ni à l'interface colle-béton ni à cause de la perte de cohésion dans la colle, mais par arrachement du béton sous les aciers d'armature, à partir d'une extrémité de la plaque. Une importante fissure de cisaillement au bord de la plaque en est à l'origine Baluch et al. (1995) ont associé cette fissure à la contrainte de décollement présente aux extrémités de la plaque. La rupture s'est produite brutalement de façon fragile[9]

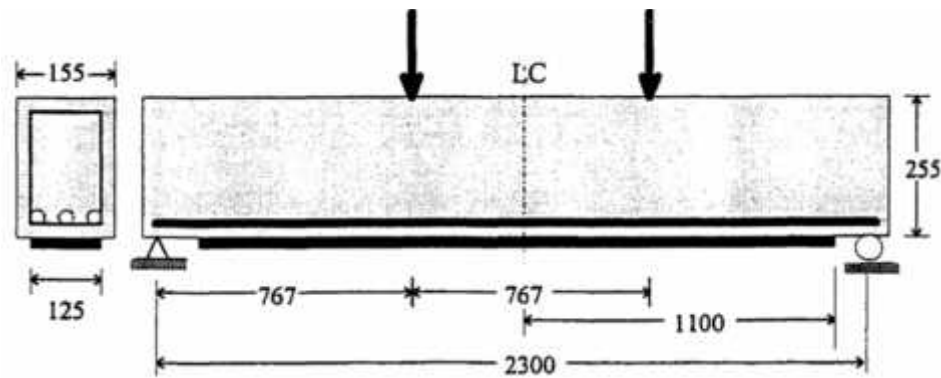


Figure I.6 : poutre armé renforcé à l'aide d'une plaque d'acier [9]

I.6. Techniques de renforcement par matériaux composites

L'utilisation de plaques d'acier collées pour renforcer des structures de béton armé a débuté dans les années soixante-dix. Quelques années plus tard les structures qui avaient été ainsi renforcées montrèrent une détérioration du joint acier-colle dû à un degré de corrosion important. Des projets de recherche ont alors été entrepris sur l'utilisation de nouveaux matériaux composites pour remplacer l'acier.

I.6.1. Le collage externe (Externally-Bonded EB)

Les expériences menées jusqu'à présent utilisent des matériaux composites en fibres de verre, en fibres de carbone ou en fibres d'aramide. Les matériaux composites utilisés pour le renforcement de poutres se présentent, généralement, sous la forme de tissus ou de plaques stratifiées préalablement fabriquées. Les comportements observés avec ce type de renforcement sont plus performants que ceux des poutres renforcées par des tôles en acier. Ainsi, l'amélioration de la durée de vie de l'ouvrage est due aux propriétés des composites : la rigidité (pour les fibres en carbone), la résistance mécanique, la résistance à la corrosion et l'étanchéité. De plus, ces matériaux permettent une conception du renfort plus adaptée au besoin de la structure grâce à des procédés qui se prêtent bien à la notion de réparation. Le matériau est fabriqué en même temps que la structure, les directions de renfort sont complètement paramétrables. La plupart des activités de recherche utilise le FRP pour le renforcement de poutres en béton armé (BA) pour augmenter leur capacité de flexion. Vis-à-

vis des renforcements au cisaillement, les recherches récentes sont très largement conduites sur des poutres de section en T par la méthode de collage externe. [5]

On peut effectuer avec les FRP un renforcement en flexion en collant les bandes sur la surface inférieure de la poutre. Un renforcement en cisaillement peut être apporté par le collage des bandes sur les joues de ces mêmes poutres.

I.6.1.1. Définition de PRF

Un polymère renforcé de fibres PRF en anglais (Fibre Reinforced Polymer : FRP) est un matériau composite qui se compose d'un arrangement de matrice et de fibres continues ou discontinues. De façon générale, les fibres de carbone ou de verre sont noyées dans une matrice polymère. La résistance mécanique de la matrice est beaucoup plus faible que celle des fibres. De par l'orientation privilégiée des fibres le matériau composite est en général anisotrope. Ses caractéristiques mécaniques et chimiques, et sa densité très favorable en font un matériau très efficace comparé au métal.

Les matrices utilisées sont généralement d'origine pétrolière, on peut citer notamment les résines polyester thermodurcissable, les résines époxydes, les résines vinylester ou encore les résines thermoplastiques (polyamides...).

Les fibres utilisées dans le renforcement de structure sont en général des fibres de carbone, de verre, d'aramide ou de basalte. Ces fibres ont un comportement élastique jusqu'à la rupture avec une très grande résistance en traction et module d'élastique comme la présentation dans le (Tableau I.1).

Tableau I.1 : les caractéristiques mécanique des fibres [5]

Matériau	Résistance en traction (MPa)	Module d'élastique (GPa)	Déformation à la rupture (%)
Verre FRP 480	1600 35	51 1.2	3.1
Basalte FRP 1035	1650 45	59 1.3	3.0
Aramide FRP 1720	2540 41	125 1.9	4.4
Carbone FRP 1720	3690 120	580 0.5	1.9

. Dans cette méthode, les bandes continues ou non-continues de FRP sont collées sur les surfaces latérales de la poutre dans les zones où l'effort tranchant est élevé. (renforcement ou cisaillement)

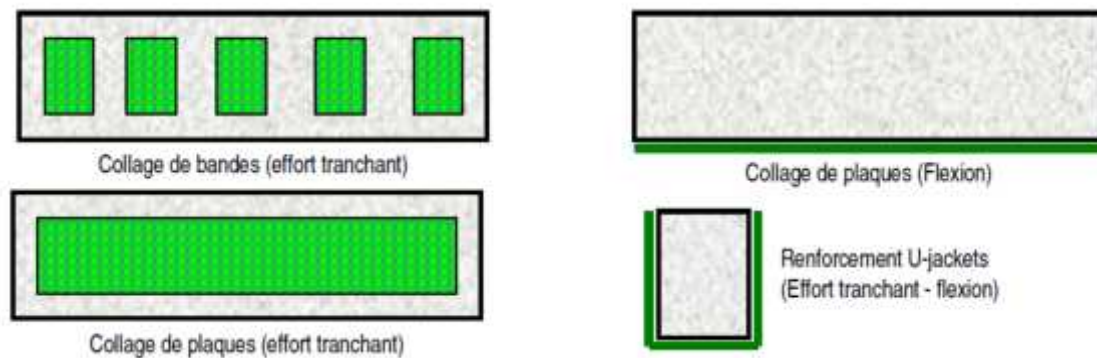


Figure I.7: Les différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques en composites [29]

L'utilisation d'un tissu de matériaux composites (FRP) associé à des colles époxy sur des surfaces tendues ou sur des surfaces latérales est un moyen très efficace pour renforcer les poutres en béton armé, plus particulièrement, pour les poutres faiblement armées. Le collage du tissu sur des surfaces tendues augmente la résistance ultime des poutres renforcées et en diminuant la flèche des structures, il augmente également leur raideur limitant ainsi la propagation des fissures. Ce phénomène permet de diminuer la corrosion des armatures et d'améliorer la durabilité des structures. Une des applications les plus courantes des matériaux composites pour le renforcement des structures en béton armé concerne les structures soumises aux sollicitations de flexion ou celles d'effort tranchant.

On peut effectuer avec les FRP un renforcement en flexion en collant les bandes sur la surface inférieure de la poutre. Un renforcement en cisaillement peut être apporté par le collage des bandes sur les joues de ces mêmes poutres.

I.6.2. Méthode de renforcement par bar NSM "Near-surface mounted"

Dans le cas de la méthode de collage externe, la ruine des poutres apparaît par le décollement du composite dans la plupart des tests. Le problème est que la surface de connexion entre béton et composite est insuffisante. Pour éviter le problème du décollement du FRP dans la méthode EB, la méthode NSM a été développée. Des rainures sont créées sur la surface de renforcement de la poutre, des bandes ou barres FRP sont mises dans les rainures et sont collées au béton par une résine époxy.

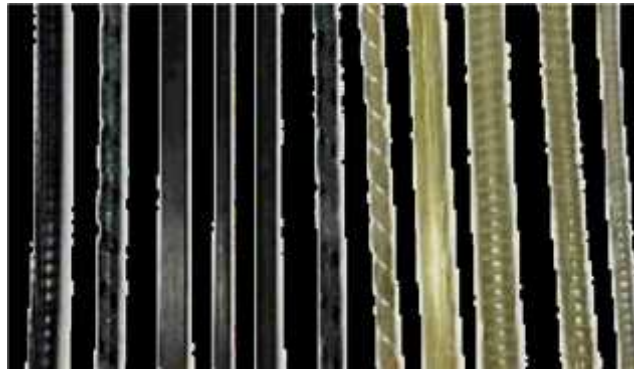


Figure I.8 : Types de barres composites (FRP) insérées avec la technique NSM [10]

Avec cette méthode, le FRP est lié avec le béton sur deux faces alors qu'une seule face est connectée dans la méthode EB, donc la liaison entre le FRP et le béton est augmentée et le décollement du FRP est limité. Dans cette méthode, les configurations de renforcement est le ratio de renforcement et l'inclinaison de barres NSM. Le problème de décollement du composite est limité dans la méthode NSM, mais les expérimentaux ont montré une séparation de la couche du béton de protection sur la zone renforcée dans le mode de rupture des poutres renforcées. Le processus de renforcement au cisaillement de poutres BA par la méthode NSM est réalisé par des étapes suivantes

- Les positions des entailles sont définies sur la surface de renforcement, les entailles sont coupées à l'aide d'une tronçonneuse avec la profondeur qui correspond à la conception. Cette étape est réalisée soigneusement pour ne pas couper les armatures longitudinales.
- Les entailles sont nettoyées à l'air comprimé pour enlever toutes les poussières et assurer une bonne adhérence entre béton et résine époxy.
- Les entailles sont remplies à 2/3 de la profondeur par de la résine époxy.
- Les joncs ou bandes de renforcement FRP sont insérées dans les entailles remplies, et enfoncés avec une pression suffisante pour assurer qu'ils soient bien en place, et qu'il n'y ait pas de vides autour des plaques.
- La résine époxy est ajoutée pour remplir complètement les entailles.



Figure I.9 : Technique de renforcement par la méthode NSM [5]

IV.3.Méthode de renforcement ETS "Embedded through-section".

Dans la méthode NSM, le mode de rupture par décollement du support béton subsiste, donc pour éliminer ce problème dans la méthode NSM et par rapport au problème de décollement du FRP dans la méthode EB, la méthode "Embedded through-section" (ETS) a été développée depuis quelques années. Dans cette méthode, des trous sont créés dans le corps de la poutre dans la zone de renforcement et les barres sont fixées dans les trous par de la résine époxy. Dans cette méthode, les barres sont connectées complètement avec le béton.

La procédure de renforcement est réalisée par les étapes suivantes (Figure I-10) :

- Les trous sont créés avec une perceuse sur les positions correspondant à la conception ;
- Les trous sont nettoyés en utilisant de l'air comprimé pour enlever les poussières et assurer une bonne adhérence entre béton et la résine d'époxy ;
- La barre de renforcement FRP et la résine d'époxy sont insérées dans les trous, dans cette étape, il faut assurer bien qu'il n'y a pas des vides dans le



Figure I.10 : les étapes de la méthode (ETS) [5]

I.7.Revue des travaux antérieurs sur la réparation ou le renforcement des poutres par matériaux composites PRF

Ritchie et al. (1991)

Ont été parmi les premiers à utiliser les matériaux composites avec la méthode de renforcement par collage de plaque. Leurs essais ont consisté à tester 16 poutres en béton armé (150 mm x 300 mm x 2450 mm, $f_b = 40$ MPa, $A_s = 2$ HA10, $f_e = 400$ MPa, $s = 60$ mm), en changeant les propriétés et la nature de la plaque de composite utilisée. La longueur du renforcement variait entre 1.7m et 2.4m tandis que la largeur était fixée à 150 mm; l'épaisseur variait entre 1 et 8 mm. Les matériaux utilisés étaient les suivants: fibres de verre ($E_p = 11700$ à 30400 MPa, $f_{pu} = 160$ à 590 MPa); fibres de carbone ($E_p = 54500$ MPa à 118000 MPa, f_{pu}

= 590 à 1500 MPa) et fibres d'aramide ($E_p = 72500$ MPa, $f_{pu} = 1180$ MPa). Pour 9 des poutres testées, l'arrachement du béton fut la cause de la rupture. En guise d'ancrages, les auteurs ont soit collé des cornières en L sur les faces verticales de la poutre, aux extrémités de la plaque (voir figure 3.12) soit prolongé la plaque jusqu'aux appuis. [9]

Le premier type d'ancrage a empêché le déchirement du béton dans 25 % des cas tandis que le second a été efficace dans 50% des cas. Les auteurs ont ainsi suggéré de réduire la contrainte de cisaillement dans la colle qui cause le décollement plutôt que de concevoir des ancrages en bout de plaque. Un moyen relativement efficace de réaliser ceci est donc de prolonger la plaque jusqu'aux appuis afin d'atténuer la discontinuité dans la rigidité de la poutre [8].

Al-Sulaimani et al. (1994)

. Leurs travaux consistaient à coller des plaques de renfort en fibres de verre sur les faces verticales des poutres en béton armé, ont étudié trois méthodes de renforcement :

S : renforcement par bandes, W : renforcement par plaques, J : renforcement en U.

Les principales conclusions de ces chercheurs sont d'abord que le renforcement à l'effort tranchant, qu'il soit du type S, W ou J. augmente la rigidité des poutres. Ils ont également remarqué que l'augmentation de la résistance à l'effort tranchant est semblable pour le renforcement par bandes (S) et par plaques (W). Le mode de rupture observé dans ce cas est un décollement des plaques de renfort à leurs extrémités, donc une rupture hale. [12]

Finalement, le renforcement en U est selon eux le meilleur parce qu'il permet une plus grande augmentation de la résistance à l'effort tranchant et qu'il n'y a pas de décollement de l'extrémité inférieure des plaques parce que celles-ci sont mieux ancrées. La rupture est alors ductile. Ce type de rupture a également été obtenu par Malvar, Wammi et Inaba (1995) lorsqu'ils ont renforcé leurs poutres avec des plaques de renfort en U constituées de fibres de carbone.

Plutôt que d'utiliser des plaques rigides en matériau composite, Chajes et Wu. (1995) ont copié un tissu de fibres qui enveloppe l'âme des poutres (dans un U) en l'imprégnant de résine époxy, les fibres des tissus qu'ils ont utilisés étaient orientées de façon à ce qu'elles forment des angles de 0° et 90° ou des angles de 45° et 135° par rapport à l'axe longitudinal des poutres. Les résultats de leurs travaux ont montré que ce type de renforcement augmente la résistance à l'effort tranchant et que les tissus dont les fibres sont orientées à 45° et 135° permettent un accroissement de résistance supérieur à celui dont les fibres sont orientées à 0° et 90° [12].

Heffernan et Erki (1996)

Les auteurs ont effectué une étude au collège militaire royal du CANADA à KINGSTON qui a également permis de démontrer les capacités des renforcement avec des plaques de matériaux composite à bas de fibre de carbone sur des poutres en béton armé .cinq poutres en béton armé ont été renforcées selon diverses configurations et testées jusqu'à la rupture ,en fait ,trois poutres en béton armé de deux mètres de long ont été fabriquées avec des configuration différentes :une poutre balancée FS($s=1.75\%$),une poutre sous-armée US ($s=1.5\%$) et une poutre sous-armé renforcée de composite RS ($s=1.5\%$);D'après les essais en flexion effectués la poutre RS étai 20% plus résistante à la plastification que la poutre US. A l'ultime, la poutre RS a enregistré un gain de résistance de près de 50%par rapport à la poutre US, alors que le gain était d'environ 25% par rapport à la poutre FS.[13]

Khalifa et Nanni (2000)

Khalifa et Nanni ont réalisé des tests sur une série de six poutres avec une section Té : 150mm x405mm x 3050mm, sans aciers transversaux, renforcées par différentes configurations de FRP par laméthode EB. Les paramètres suivants sont étudiés :

- (i) Configuration de FRP (renforcement continu vs bandes discrètes) ;
- (ii) Surface de collage (deux faxes vs forme-U) ;
- (iii) Combinaisons des directions de fibre (90° - 0° en combinaison de direction de fibre $v90^{\circ}$ direction)
- (iv) Effet d'ancrage (forme-U avec ancrage vs forme-U sans ancrage).

Les résultats montrent que toutes les poutres atteignent la rupture par décollement du FRP. Grâce à lacontribution du FRP, la résistance au cisaillement de la poutre est augmentée de l'ordre de 35% à135% par rapport au cas de la poutre non renforcée. Pour les poutres avec le renforcement FRP enforme-U et l'ancrage, l'ancrage a démontré son avantage sur la résistance au cisaillement de la poutre,le mode de rupture a évolué d'une défaillance en cisaillement à une défaillance en flexion. Concernantl'effet de la configuration du renforcement, les Auteurs ont conclu que l'application du FRP sur lessurfaces latérales uniquement donne le résultat le moins intéressant pour le renforcement aucisaillement. [5]

Les résultats ont indiqué que les fibres horizontales n'ont pas d'effet sur la résistance aucisaillement de la poutre.

Mosallam et al (2015)

Les auteurs ont testé la performance d'un composite non-conventionnelle de (FRP) pour la réparation des poutres en béton armé appelé (thé H-Lan System) fournit un panneau sandwich alvéole (Honeycomb) préfabriqué qui se compose de deux faces composites à fibres (carbone ou verre), séparées par et reliées à une âme de structure légère qui sont moins rigidité que la partie supérieure composite, et des faces inférieures. Les faces et le noyau sont reliés par un adhésif qui offre une continuité structurelle entre la profondeur du panneau ce système de renforcement est sous forme des panneaux sandwich FRP minces qui sont collés ou boulonné au béton les résultats obtenue ont indiqué que les panneaux sandwich (thé H-Lan System) sont efficace pour le renforcement ,car ils augmentent à la fois la résistance à la flexion et la rigidité des poutres renforcées, un gain moyen de la capacité de flexion de 55% et 80% a été ajouté ou poutres renforcées.[14]

Attari1 S et al (2011)

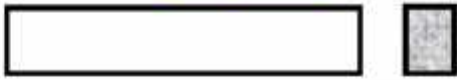

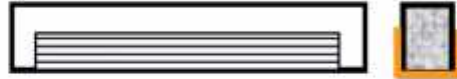


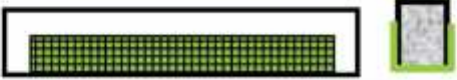

Les auteurs ont testé l'efficacité du renfort externe sur les poutres renforcées par le tissu de FRP (verre - carbone). Un total de sept poutres en béton armé a été renforcé en flexion et en cisaillement, et testé sous un chargement quatre points cyclique statique. Les champs des contraintes et de déformation ont été contrôlés par un système de caméra numérique "Gom-Aramis". Les résultats ont été analysés en termes de résistance, rigidité, ductilité et mode de rupture est comme suite Le comportement de la majeure partie des poutres renforcées, s'est accompagné d'une amélioration significative de la rigidité.[15]

Les poutres de la série A ont eu un meilleur comportement et une meilleure déformabilité, ceci est dû à l'utilisation d'un tissu en fibre de verre ayant une grande élongation à la rupture.

. Les poutres de la série B n'ont pas donné les résultats escomptés, du fait qu'elles n'ont pas eu un comportement ductile. Cela est dû au type de renfort qui possède une faible élongation à la rupture, ainsi le tissu hybride bidirectionnel ou la direction des fibres perpendiculaire à l'axe de la poutre n'a pas amélioré le comportement des poutres.

Les poutres de la série A ont eu une ductilité très proche de celle de la poutre de référence. Ces résultats contredisent ce qui par le passé a été largement cru, qui en raison de la haute rigidité de la plupart des renforts composites, la ductilité des poutres renforcées est réduite, causant la rupture fragile et soudaine le tableau suivant présente le renforcement effectué dans cette étude [15].

Tableau I. 02 : Configuration des poutres testées [15]

	Poutre	Configuration	Type de Renfort
	Pc		Poutre Témoin
SERIE A	PA1		Tissu carbone CFRP 1 Couche U à 0° et 1 Couche U à 90°
	PA2		Tissu Verre GFRP 2 Couches U à 0° et 1 Couche à 90°
	PA3		Mélange CFRP+GFRP 1 Couche C FRP 0° 1 Couche GFRP 0°
SERIE B	PB4		3 Couches HFRP en U
	PB5		2 Couches HFRP en U
	PB6		3 Couches HFRP

M.Abdessamed et S. Kenai (2003)

Les auteurs ont contribué à l'introduction de la technique de renforcement par matériaux composites en Algérie par une investigation expérimentale sur neuf poutres de dimensions réduites en béton armé. Les poutres ont une longueur de 170 cm, et 110 cm de portée et de section 16×18 cm². Les armatures sont de trois barres d'acier HA12 dans la partie tendue et de deux barres HA10 dans la partie comprimée, tandis que les cadres sont des aciers doux lisse de diamètre 8 mm, espacés de 20 cm. Ces spécimens d'essai se distinguent essentiellement par le type du composite collé et les manières et les localisations du collage appliqué. Les deux premières sont des poutres test, elles ne sont pas renforcées, les sept autres sont réparties en deux catégories. La première est celle des poutres renforcées avant chargement par collage de trois composites différents : TFC Freyssinet, SikaCarbodur lamelle et SikaWrap alors que la deuxième catégorie est celle de quatre poutres réparées par injection et placage des composites après le chargement et l'apparition des fissures (Tableau I.3) [13].

Tableau I.03. : Désignation des poutres renforcées avant et après endommagement et mode de collage des différents composites [13]

Nomination Poutre		Schéma de renforcement et réparation	Détail du renforcement	Mode d'essai
Poutres de référence		P1 et P2	-	Chargement jusqu'à rupture (sans renforcement)
Poutres réparées	P2		S.Wrap (30*(18+16+18) et S.carbodur (100* 8)	Chargement jusqu'à fissuration puis injection et réparation et chargement jusqu'à rupture
	P3		Lamelle Sika carbodur (100* 8)	
	P4		1couche Sika Wrap (100* 30)	
	P5		Fissures injectées par résine et colmaté	
Poutres renforcées	P6		1couche TFC (100*8)	Renforcement à vide puis chargement jusqu'à rupture
	P7		Lamelle Sika Carbodur (100*8)	
	P8		Sika Wrap (30*(18+16+18) et Sika.carbodur (100* 8)	
	P9		1couche Sika Wrap (100* 30)	

Ils ont obtenu d'importants résultats notamment en terme de gain de capacité portante, de réduction d'apparition et d'ouverture de fissures ainsi que les flèches. (La figure. I.11) présente les résultats pour le cas de renforcement, et la figure.I.11 récapitule les résultats pour le cas de réparation.

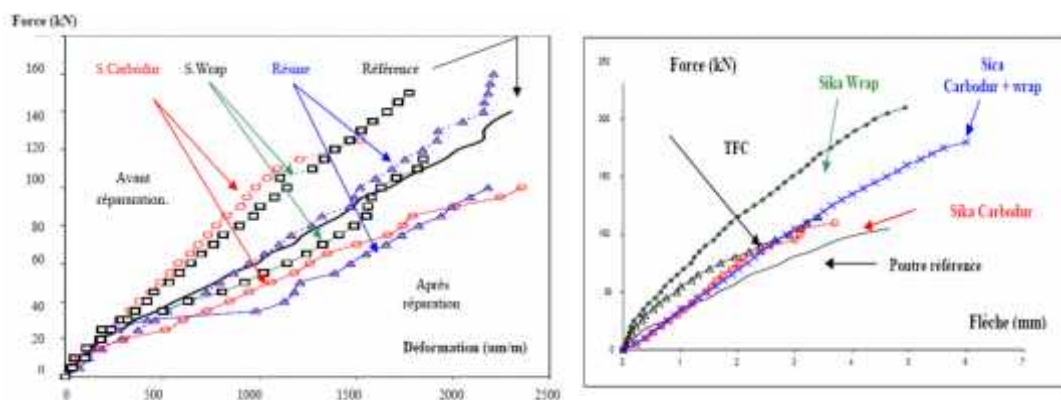


Figure I.11 : Courbes force-déformation des aciers pour poutres réparées et renforcées [13]

Ze Yi Wu (2004)

Au cours de leur projet de recherche Ze Yi Wu (2004) a fait une étude expérimentale du comportement de poutres courtes en béton armé pré-fissurées puis renforcées par matériaux composites à base de fibres de carbone sous chargement quasi statique et de fatigue, a été menée par le biais d'essais de flexion 3 points. Pour l'ensemble de 22 poutres courtes ($15 \times 20 \times 70 \text{ cm}^3$) armées de 2HA8 ou 2HA10 en partie tendue ont été testées en flexion 3 points.

Quatre modes de renforcement sont utilisés dans cette étude (cf. Figure I a, b, c, et d) : il s'agit d'un renforcement sur la face tendue et de renforcements sur les faces latérales. Pour ces derniers, les bandes latérales en forme de "U" sont de différentes hauteurs et différentes largeurs. Le composite en face tendue a toujours une largeur de 150 mm et une longueur de 550 mm , avec une distance de 25 mm entre l'extrémité du tissu et l'appui.

Pour les résultats de cette étude en intéresse par les poutres courtes n'ayant pas subi de chargement de fatigue, et avec un taux de renforcement d'armatures métalliques de $0,39\% \sim 0,62\%$, la présence de composite en face tendue améliore considérablement la résistance ultime vis-à-vis du moment fléchissant, mais n'a pas d'influence vis-à-vis de la reprise de l'effort tranchant, d'où la nécessité d'un renfort latéral. Le renforcement composite latéral en forme de "U", collé aux extrémités du tissu longitudinal tendu, empêche son décollement, et améliore la résistance à l'effort tranchant de l'élément renforcé. Un renforcement latéral couvrant toute la hauteur de la section est le mode de renforcement le plus efficace.[16]

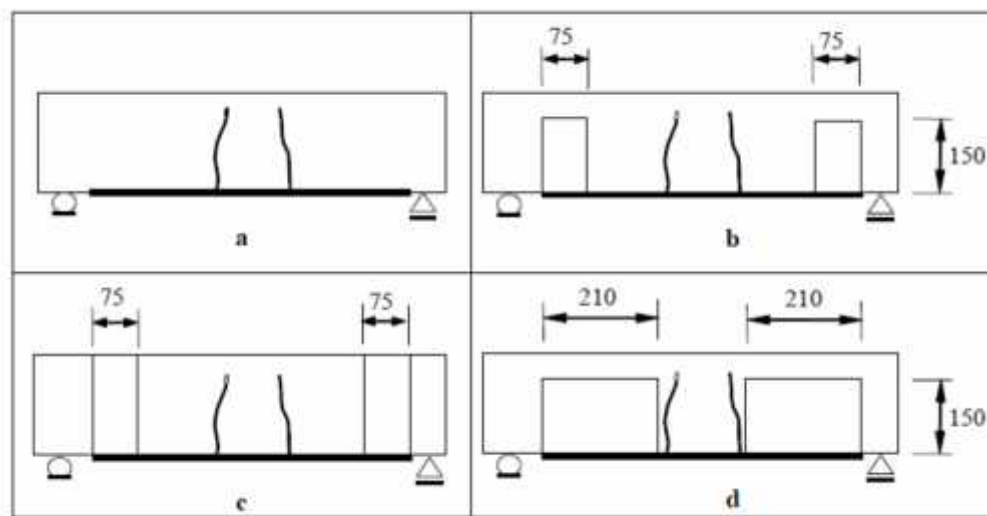


Figure I.12 : Modes de renforcement des poutres courtes[16]

Rizzo et De Lorenzis (2009)

Rizzo et De Lorenzis ont réalisé un programme de recherche sur le renforcement au cisaillement de poutres BA par barres de renforcement. En utilisant la méthode NSM, Un total de 9 poutres, de 2 m de longueur avec section rectangulaire, est testé pour analyser l'influence du renforcement sur le comportement de la structure et le mode de rupture. Les paramètres suivants sont étudiés :

- (i) Le type de renforcement NSM (barres ou bandes) ;
- (ii) L'espacement et l'inclinaison (45° et 90°) du renforcement NSM ;
- (iii) Les propriétés mécaniques de la résine époxy.

Il y a une poutre renforcée par la méthode EB qui est testée servant de comparaison avec la méthode NSM.

Toutes les poutres sont armées par armatures longitudinales et transversales pour s'assurer que les poutres renforcées et les poutres non renforcées aient une rupture en cisaillement. Ils utilisent 2 et 4 barres de 22 mm de diamètre pour l'acier longitudinal en compression et en traction, respectivement.

Les variables des tests se composent de l'espacement, de l'angle d'inclinaison et de l'ancrage des barres dans la membrure .

Les résultats montrent que le renforcement NSM augmente la résistance au cisaillement de la poutre de 106 % avec l'absence d'aciers transversaux. Le gain des barres NSM est diminué par la présence de l'acier transversal. Globalement, l'augmentation de la capacité en cisaillement est d'environ 16 % pour la poutre renforcée par la méthode EB, et de 22 % à 44 % pour les poutres renforcées par le renforcement NSM. [17]

SKermiche & B Redjel (2012)

L'objectif de cette étude est d'observer le comportement des poutres renforcées par des matériaux composites. L'analyse a été faite par une étude expérimentale et analytique sur onze éléments en béton et en béton armé sous et moyennement armés, pré-fissurés puis renforcés par du tissu en fibre de carbone collé in situ à l'aide d'une résine époxy. Afin d'étudier l'influence de l'état de fissuration initiale sur le comportement, l'une des poutres a été renforcée sans qu'elle ne soit pré-fissurée et a été comparée à une poutre pré-fissurée et renforcée puis à une autre chargée jusqu'à la rupture sans être pré-fissurée ni renforcée. Dans cette étude quatre poutres ont été pré-fissurées et renforcées dans leur partie tendue et sur la

partie latérale avec des bandes en forme de U de différentes dimensions dans le but d'éviter le décollement d'une part et d'étudier la reprise du composite à l'effet du cisaillement [18].

Les types renforcements sont présentés dans le tableau I.4.

Tableau I.4: Détails des éprouvettes d'étude de SihemKermiche & Bachir Redjel [18]

Poutres de (13*20*120) cm ³	Poutres	Armatures	Taux de renforcement	Renforcement en TFC	Pré-fissuration	Mode de renforcement
	P1	3HA8	0.66	1 pli	oui	a
	P2	3HA12	1.45	3 plis	oui	b
	P3	3HA8	0.66	1 pli	non	a
	P4	3HA8	0.66	/	non	/
	P5	/	/	/	oui	/
Poutres modèles réduits	P6	2 ϕ 5	1.45	/	non	/
	P7	2 ϕ 5	1.45	/	oui	/
	P8	2 ϕ 5	1.45	1 pli	oui	b
	P9	2 ϕ 5	1.45	1 pli	oui	c
	P10	2 ϕ 5	1.45	1 pli	oui	d
	P11	/	/	/	1 pli	oui

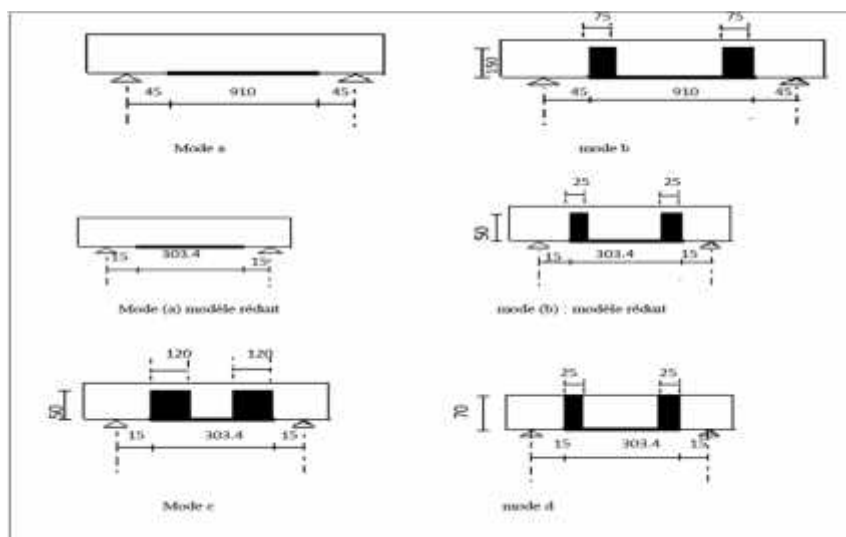


Figure I.11: Modes de renforcement des poutres d'étude de SihemKermiche & Bachir. [18]

Un gain de résistance ultime des poutres le TFC allant jusqu'à 51% par rapport au témoin est observé. Ce gain de résistance reste limité pour les poutres normalement armées par rapport à celles faiblement armées.

- Les poutres renforcées présentent un comportement plus rigide avec une réduction significative de la flèche
- Un bon comportement des poutres initialement pré-fissurées par rapport à la poutre renforcée directement Il est possible d'améliorer la résistance à l'effort tranchant en utilisant des bandes en forme de U collées extérieurement [18].

Li et Leung (2015)

L'expérience est réalisée sur 12 poutres rectangulaires en flexion 3 points divisée en 6 séries distinctes. Chaque série est composée de 2 poutres : une référence et une renforcée. La poutre renforcée de chaque série est renforcée par la même configuration (des bandes de 60mm de largeur et avec un espacement de 150 mm) par collage externe, le composite enveloppe complètement la section de poutre. La différence entre les séries est le rapport (a/d) entre distance de charge-appui et la hauteur efficace de la section et la longueur de poutre. Les poutres qui ont $a/d=1.0$; 1.5 ; 2.0 ; 2.5 ont 2.0m de travée et qui ont $a/d=3.0$; 3.5 ont 2.4m de travée. [19].

Les résultats montrent que la contribution au cisaillement du composite est croissante avec l'augmentation du rapport a/d mais qu'à partir de $a/d=2.5$ la contribution du composite est diminuée

Les auteurs confirment aussi que le facteur de la distribution de déformation De FRP =0.5 est conservatif pour le cas des a/d faible. [19].

M. boumaaza, B.Bezazi et al (2015)

Les auteurs ont réalisé une étude expérimentale sur sept poutres en béton armé identiques. Les trois premières sont des poutres de référence, les deux autres poutres sont pré-chargées à 40% puis chargées jusqu'à la rupture et renforcées par collage de tissus en PRFV sous forme de U suivant une orientation 30/60 adoptée d'après des études antérieures, deux poutres renforcées par une nouvelle méthode. [20].

Les poutres ont 730 mm de portée et $100 \times 180 \text{ mm}^2$ de section, elles sont armées par deux barres HA8 dans la partie tendue et par deux barres HA 6 dans la partie comprimée de la poutre. Pour les aciers verticaux (cadres en acier), on a utilisé un acier doux lisse de diamètre 6 mm, ils sont espacés de 110 mm

La méthode de renforcement utilisée dans cette étude est celle développée par l'équipe est illustrée en figure 2c. Après perçage des trous (figure b) une réparation des poutres endommagées à l'aide du mortier en béton a été effectuée.

Les différents renforcements ont été disposés de façon à intercepter les fissures diagonales le plus précisément possible. Afin de faciliter l'implantation du tissu unidirectionnel avec la résine dans ces trous, celles-ci sont entrelacés en pointe pour qu'elles se centrent naturellement dans le trou. Il faut que ces trous soient très propres avant d'injecter la résine.[20]



Figure I.12 : renforcement par la méthode SCR [20]

La réhabilitation des poutres par la nouvelle technique SCR a permis des augmentations respectivement de l'ordre de 25, 21 et 11% par rapport aux poutres réhabilitées par PRFV en forme de U par deux et trois plis et la poutre en béton témoin. De plus, cette technique a permis aussi de changer le mode de rupture d'une rupture par cisaillement fragile à une rupture par flexion béton en lui conférant une plus grande ductilité. [20]

I.8. Comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites

L'utilisation d'un tissu de matériaux composites (FRP) associé à des colles époxy sur des surfaces tendues ou sur des surfaces latérales est un moyen très efficace pour renforcer les poutres en béton armé, plus particulièrement, pour les poutres faiblement armées. Le collage du tissu sur des surfaces tendues augmente la résistance ultime des poutres renforcées et en diminuant la flèche des structures, il augmente également leur raideur limitant ainsi la propagation des fissures. Ce phénomène permet de diminuer la corrosion des armatures et d'améliorer la durabilité des structures. Une des applications les plus courantes des matériaux composites pour le renforcement des structures en béton armé concerne les structures soumises aux sollicitations de flexion ou celles d'effort tranchant.

I.8.1. Mécanismes de rupture des poutres renforcées

La combinaison des matériaux composites comme renforcement de poutres en béton armé produit de nouveaux modes de rupture .d'après MEIER et COLL(1992), ces poutres peuvent se situer à différents niveaux : dans la poutre en béton armé, dans le composite ou dans l'interface béton -composite.[11]

Quatre modes de rupture sont souvent constatées dans les études expérimentales :

La rupture due à la flexion, celle due à l'effort tranchant, celle due au décollement du tissu et celle due à la rupture de l'enrobage du béton Parmi celles-ci, le décollement du tissu et la rupture de l'enrobage du béton sont prématurés et souvent brutaux

Les principaux modes de rupture susceptibles d'être observés dans les poutres en béton armé, et renforcées extérieurement avec collage de FRP sont les suivants [11] :

- Rupture fragile en tension de composite, dans ce cas, la plaque se rompt plus ou moins soudainement avec un claquement .même si la rupture du composite se produit de manière fragile, les déformations atteintes sont très importantes, ce qui se traduit au niveau de flèche observée. Dans des conditions de service normales, les flèches correspondant à cet état de rupture auraient depuis longtemps dépassé les limites admissibles.
- Rupture classique du béton de la poutre dans la zone en compression .ce mode de rupture correspond essentiellement à ce qui se produirait dans une poutre en béton armé qui contiendrait une quantité d'armature en flexion supérieure au rapport maximum autorisé par les normes actuelles [11].
- Rupture continue par délaminage de la plaque composite .ceci se produit généralement aux extrémités de la plaque de renforcement elle peut être favorisée par la non-uniformité de la surface de contact.
- Rupture continue par délaminage de la plaque par cisaillement durant l'essai, suite à l'apparition de fissures de cisaillement dans le béton .cette rupture est causée par un déplacement relatif vertical de la face fissurée .le délaminage peut être amorcé à n'importe quel point de long de la poutre, mais surtout à proximité de charges concentrées.

- Rupture inter laminaire en cisaillement. Celle-ci peut survenir, soit à l'intérieur de la couche de composite, soit à l'interface composite-adhésif ou à l'interface béton-adhésif.

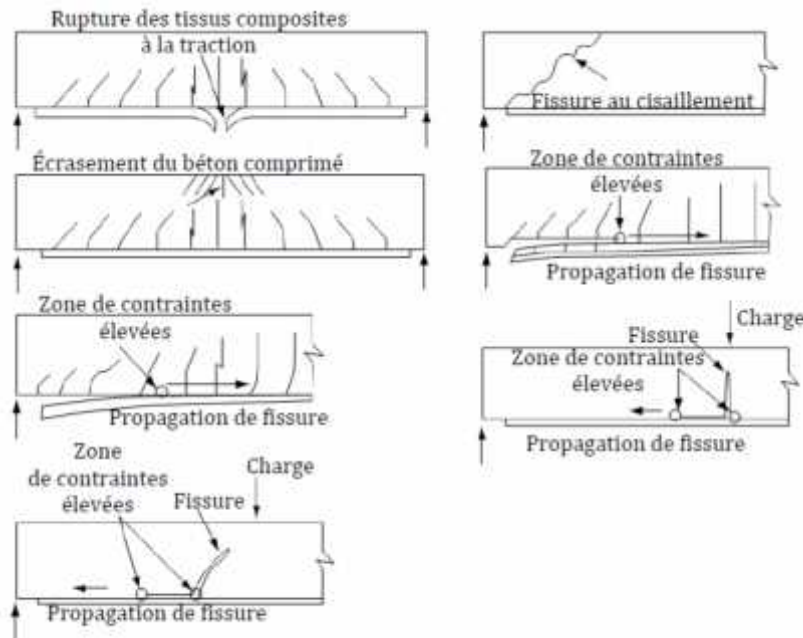


Figure I.13: Modes de ruine conventionnelle et précoce des poutres renforcées en flexion par technique de collage des tissus composites.[22]

I.8.2. Problème d'adhérence avec le béton.

Dans le renforcement externe par matériaux composites, les matériaux composites présentent une efficacité significative dans la capacité de la structure. Le problème qui apparaît souvent dans ce type de renforcement est le décollement du composite (Figure I.13). Ce problème limite la contribution du composite à la résistance de la structure.

Plusieurs types de rupture peuvent apparaître :

- Décollement du béton d'enrobage des armatures ;
- Décollement du renfort composite à son extrémité ;
- Décollement localisé du renfort sous la fissuration au cisaillement ;
- Décollement localisé du renfort sous la fissuration de flexion.

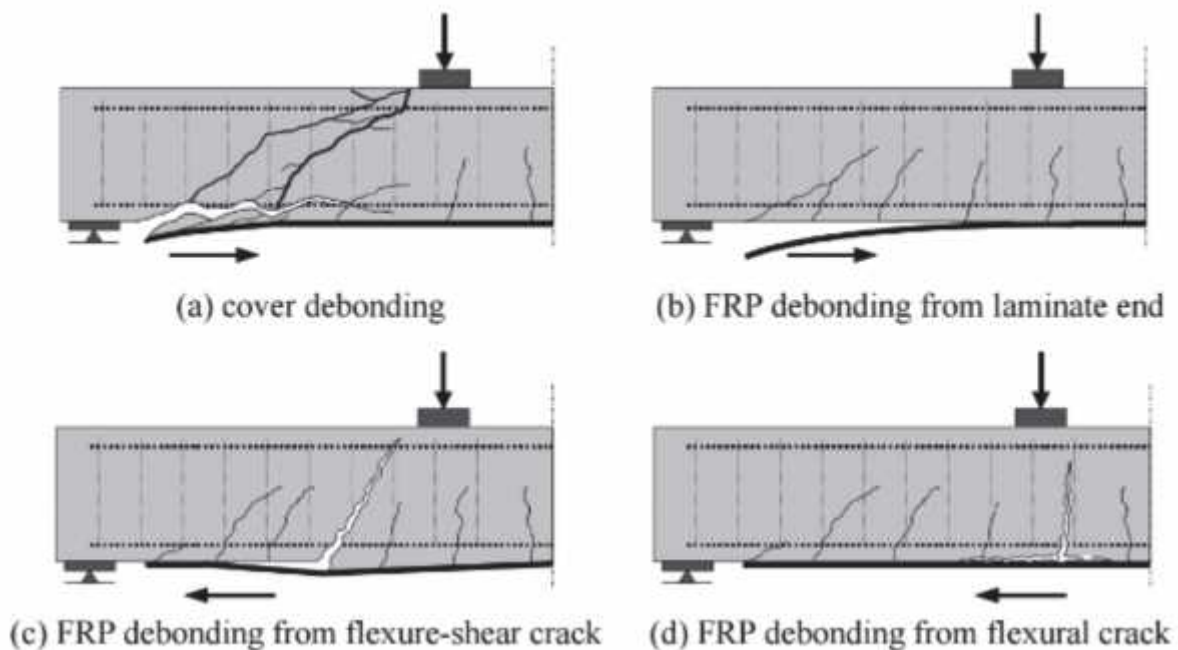


Figure I.13 : mode de rupture par décollement de tissu [5]

I.9. Utilisations des composites

- **Au Japon**

Le Japon est une région particulièrement touchée par les tremblements de terre et regroupe plus de 1000 îles, et les phénomènes de corrosion saline sont souvent observés. Par conséquent, un intérêt particulier est donné au développement des composites à base de fibre de carbone pour le renforcement des structures. De nombreux ponts en béton précontraint ont dû être renforcés extérieurement en raison de la corrosion des aciers. Ces renforcements ont été appliqués sur les piles ou sur les faces inférieures des tabliers en utilisant des tissus pré imprégnés à base de fibres de carbone comme renfort

À partir de 1995, le nombre des réalisations a fortement augmenté. Les applications se trouvent dans tous les domaines industriels, renforcement extérieur de cheminées, de tunnels routiers, ferroviaires ou de métro, de sites de stockages naturels de pétrole ou de gaz, et mur de bâtiments. [23].

Des treillis en fibres de carbone sont utilisés dans des murs de bâtiments de banques non seulement pour leurs propriétés mécaniques mais aussi en tant que conducteur électrique et sont reliés aux systèmes d'alarme. En mars 1998, la structure métallique d'un bâtiment a été remplacée par une structure à base d'un composite de carbone.

Un programme national de mise en conformité parasismique des bâtiments et des ouvrages d'art est en cours et fait du Japon le premier consommateur de fibres de carbone dans les secteurs du bâtiment et des ouvrages d'art. La consommation de fibres de carbone au Japon pour l'ensemble des BTP était supérieure à 300 t en 1996 et à 500 t en 1997 [23].



Figure I.14 : Sakawagan Bridge au Japon (8 piles de 42 à 65 de hauteur et de 7 m de diamètre) : passerelle de mise en œuvre de la fibre de carbone[23]

- **En Algérie**

1. Le premier cas d'utilisation de ces produits a été le renforcement des consoles en béton armé du stade de la ville de Tlemcen 1999 [SIK 03]. Depuis cette réparation, de nombreux autres cas d'utilisation de composites sont répertoriés (pont d'Hydra, pont de Oued Larbaâ, Pont Blanc d'El Harrach, etc.). Le cas du pont Blanc, situé à El Harrach, Alger, présente un des premiers exemples concrets de l'utilisation à grande échelle des composites pour le renforcement des ponts en Algérie (figure I.15).



Figure I.15 : Pont de OUADE EL HARACHE



Figure I.16 : Réparation et renforcement des poutres de pont par matériaux composites [13]

2. HOTEL AZZEMOUR BEJAIA Hôtel bâti sur huit niveaux, comprenant 2 sous sols et 5 étage, (figure I.11) surplombant le port de BEJAIA c'est une construction non achevée .délaisée des dizaines d'années ,la bâtisse est en phase de dégradation .repris par un nouveau propriétaire en 2015 .l'hôtel fait l'objet de travaux rénovation.

Après acquisition de l'hôtel par le consortium Algéro-Saoudien ASICOM, une étude déléguée au BETBICER a décelé une détérioration du béton sur des endroits sensibles (des éléments structurels) tels que les poutres et les poteaux.



Figure I.17 : Hôtel AZZEMOUR-BEJAIA [24]

La solution Passivation du ferrailage puis réparation par un mortier mono composant classé R4 de très hautes performances adapté aux milieux agressifs selon la norme EN1504-3 Application des tissus de fibres de carbone ou des lamelles de fibre de carbone destiné à la réparation ou renforcement des structures en béton armé (SIKA CARBODUR /SIKADUR-30) et (SIKAWRAP/SIKADUR-330). (Figure I.12)[24]



Figure I.18 : Application de composite sur les poutres d'hôtel [24].

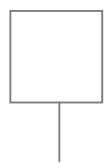
I.10. Conclusion :

Le présent chapitre qui porte sur les différents types de désordres affectant les ouvrages, les méthodes de réparation ou renforcement des structures en béton soit classique ou moderne par matériaux composites, nous a permis de conclure qu'avec l'essor que connaissent les matériaux composites, suite à leurs performances mécaniques, de plus en plus des techniques de renforcement et de réparation de structures de génie civil en utilisant ces matériaux sont développées et proposées.

La synthèse de cette recherche bibliographique, nous a conduits d'une part à nous intéresser en premier lieu aux différentes techniques de réparation de béton, puis en second lieu, de proposer une étude expérimentale pour étudier le comportement des poutres en béton armé réparées par un renfort hybrides avec différentes configuration.

PARTIE II

Étude Expérimentale



II.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 deux classe de béton, un béton de 20Mpa et un autre de 40Mpa. A cette effet, des essais de compression sont menés suivant la norme NFP18-406 sur des éprouvettes cylindrique (16/32) et des essais de flexion sont réalisés sur des éprouvettes prismatique (7*7*28) selon la norme NF EN ISO 178 ASTM D790 pour déterminer la résistance de nos béton. La seconde partie est consacrée en premier lieu aux résultats des essais de flexion sur les poutres qui ne subissent aucune opération de pré fissuration ou réparation et cela dans le but de voir la résistance obtenue après la formulation des compositions de béton. Ensuite, des essais de pré-fissuration sur les poutres destinés à la réparation de béton armé ont été réalisés

Dans la troisième section, les résultats de l'essai de flexion jusqu'à la résistance ultime sur les poutres réparées par les différentes configurations seront présentés suivie par leur comportement, cette section comprendra une comparaison entre les résultats expérimentaux des essais de flexion sur les poutres réparées et non réparé en terme de résistance et déplacement.

II.2. Objectif de travail

Ce travail de recherche est une contribution aux travaux réalisés sur la réparation et le renforcement des structures en béton armé. L'objectif principal de ce travail est l'étude expérimentale du comportement des poutres en béton armé sous un chargement de flexion, initialement pré-fissurés jusqu'à la fissuration intense et puis réparés par le collages des matériaux composites avec plusieurs configuration géométriques

Le protocole expérimental, contient les caractéristiques des matériaux utilisés, les notations et les procédés de construction de toutes les éprouvettes ainsi que leur réparation. Les résultats obtenus sont présentés et discutés.

II.3. Caractéristique des matériaux utilisés

Pour utilisé un matériau dans une étude il faut connaitre d'abord leur caractéristique (physique, chimiqueetc.), puisque chacune de ces caractéristiques peuvent influencer sur les résultats, ces pour cette raison qu'on a procédé à la caractéristiques de chaque constituant qui va être utilisé dans cette étude.

II.3.1.Ciment

Dans ce travail on a utilisé deux types de ciment portland, u ciment (I) composé de type CEM II 42.5, nommé commercialement (MATINE) et un ciment (II) composé de type CEM II 32.5, nommé commercialement (CHAMIL), provenant de la cimenterie de LAVARGE (M'SILA)

La composition chimique, minéralogique et caractéristique mécanique sont représentées dans les tableaux (II.1, II.2, II.3, II.4).

Tableau II.1 : Caractéristique physique des deux ciments [27][28].

	Ciment (I)	Ciment (II)
Consistance normale (%)	0.26	0.26
Début de prise à 20°C(NA230) (min)	(140-180)	(120__200)
Fin de prise (min)	(200—280)	(200__300)
SSB (NA231) (cm²/g)	3400--5400	4400__5400
Poids spécifique (g/cm³)	3.11	3.11
Retrait à 28j (µm/m)	1000	1000
Expansion (mm)	3	0.5__2.5

Tableau II.2 : Caractéristique mécanique du ciment [27] [28]

Essai	2jours		7 jours		28jours	
	Ciment (I)	Ciment (II)	Ciment (I)	Ciment (II)	Ciment (I)	Ciment (II)
Résistance à la compression (MPa)	10.0	10	34.3	28.2	42.5	32.5
Résistance à la flexion (MPa)	5.03	3	5.8	4.3	7.15	5.3

Tableau II.3. Analyses chimique du ciment [27] [28]

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	chlorures	PAF
Ciment(I)	62.10	18.4	4.00	2.1	3.1	0.15	0.64	1.7	0.05	10
Ciment(II)	62.10	18.4	4.00	2.1	2.8	0.15	0.64	2.4	0.04	10

Tableau II.4. Composition minéralogique du ciment [27] [28].

	C ₃ S %	C ₃ A %
Ciment (42.5Mpa)	60—63	7.5—8.5
Ciment (32.5Mpa)	55—64	6.2—8

II.3.2. Les granulats :

II.3.2.1. Graviers

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

Les caractéristiques physico-mécaniques et l'analyses granulométrique par tamisage de gravillon 3/8 et 8/15 sont présentées dans les tableaux suivants (II.5, II.6, II.7)

Tableau II.5. caractéristique physico.-mécanique du gravier 8/15 et 3/8

Caractéristique	8/15	3/8
Masse volumique absolue g/cm ³	2.64	2.67
Masse volumique apparente g/cm ³	1.47	1.48
Los Anglos %	24.4	/
Absorption %	0.60	0.60
Porosité %	1.58	1.58
Coefficient d'aplatissement %	7.82	/

Tableau II.6 : Analyse granulométrique de gravier 8/15 Selon la norme EN 933-1 "

Tamis ouverture (mm)	Retenu cumulé (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)
20	0	0	100
16	461.7	15.39	84.71
14	1251.4	41.7	58.3
12.5	1839.1	61.3	38.7
10	2549.2	84.97	15.03
8	2918.7	97.29	2.71
6.3	2988.7	99.48	0.52
5	2995	99.81	/
F.tamis	3000	100	/

Remarque : Coefficient d'aplatissement **"selon la norme NA EN933-3"** A=7.82%

Exigence normative : coefficient d'aplatissement A <20 donc il est conforme à la norme.

Tableau II.7 : Analyse granulométrique gravier de 3/8 "Selon la norme EN 933-1"

Tamis ouverture (mm)	Retenu cumulé (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)
8	2.6	0.13	99.87
6.3	138.3	6.9	93.1
5	517.6	25.88	74.21
4	894	44	55.3
2.5	1450	72.5	27.5
1.25	1809.5	90.47	9.6
0.63	1906.7	95.33	4.7
0.315	1943.6	97.8	2.9
0.16	1991.5	99.575	0.43
0.08	1992.5	99.635	0.365
F. tamis	1993.8	100	

II.3.1.2.Sable

Le sable utilisé dans cette expérimentation, est un sable constitué à partir de deux types sable :

- Sable concassé (0/3) (HACHIMIYA)
- Sable fin roulé (0/1) (BOUSSAADA)

Les propriétés physico-chimiques des deux sables sont représentées dans le tableau suivant (tableau II.8).

Tableau II.8 : Propriétés physico-chimiques

Propriétés		0/1	0/3
La masse volumique apparente g/m ³		1.44	1.69
La masse volumique absolue g/m ³		2.67	2.67
Teneur en bleu (NF EN 933-9) %		0.35	0.6
Absorption %		0.048	0.4
Propreté	ESV %	72.21	79.27
	ESP %	57.02	76.71

Observation: L'équivalent de sable à piston (ESP) de sable de HACHIMIYA est égal à 72.7%, l'exigence normative >65 donc le sable analysé est propre.

Tableau II.9. Analyse granulométrique de sable 0/3 « Selon la norme EN 933-1 »

Tamis ouverture (mm)	Retenu cumulé (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)
5	4.7	0.47	99.83
4	33.7	3.34	96.63
2.50	244.6	24.46	75.54
1.25	573.00	57.3	42.7
0.63	797.1	79.71	20.29
0.315	920.2	92.02	7.98
0.16	965.3	96.53	3.47
0.08	982.3	98.23	1.77
Fond de tamis	995.6	99.56	0

Tableau II.10. Analyse granulométrique de sable 0/1 "Selon la norme EN 933-1"

Échantillon 1 (g)		Échantillon 2 (g)	
M1h	500	Mh	1000
M1s	488,2		
Poids sec = (M1s/M1h)*Mh			976,40
Tamis	Retenu cumulé	Retenu cumulé	Passant
5	0	0	100
2.5	0	0	0
1.25	0	0	0
0.63	923,6	4,59	5,41
0.315	972,2	99,57	0,43
0.160	0,2	0,02	99,98
0,125	923,6	4,59	5,41
0.08	972,2	99,57	0,43
Fond de tamis	972,4	99,59	0,

Observation: On remarque que le sable de HACHIMIYA à un module de finesse élevé (3.5), donc, une correction est nécessaire. A cet effet on utilise sable de Boussaâda 0/1 $M_f=0.95$ comme sable correcteur.

Le module de finesse $M_{f=}$ refus de tamis 0.16,0.315,0.63,1.25,2.5,5/100

🌈 On a fait la correction du sable de BOUZEGZA par le sable de BOUSSAADA (sable fin) selon la méthode D'Abrams :

- %de sable de HACHIMIYA = $(2.5 - M_{f_2}) / (M_{f_1} - M_{f_2}) = 0.31$
- %de sable de Boussaâda = $(M_{f_1} - 2.5) / (M_{f_1} - M_{f_2}) = 0.69$
- Sable de HACHIMIYA = **31%**
- Sable de Boussaâda = **69%**

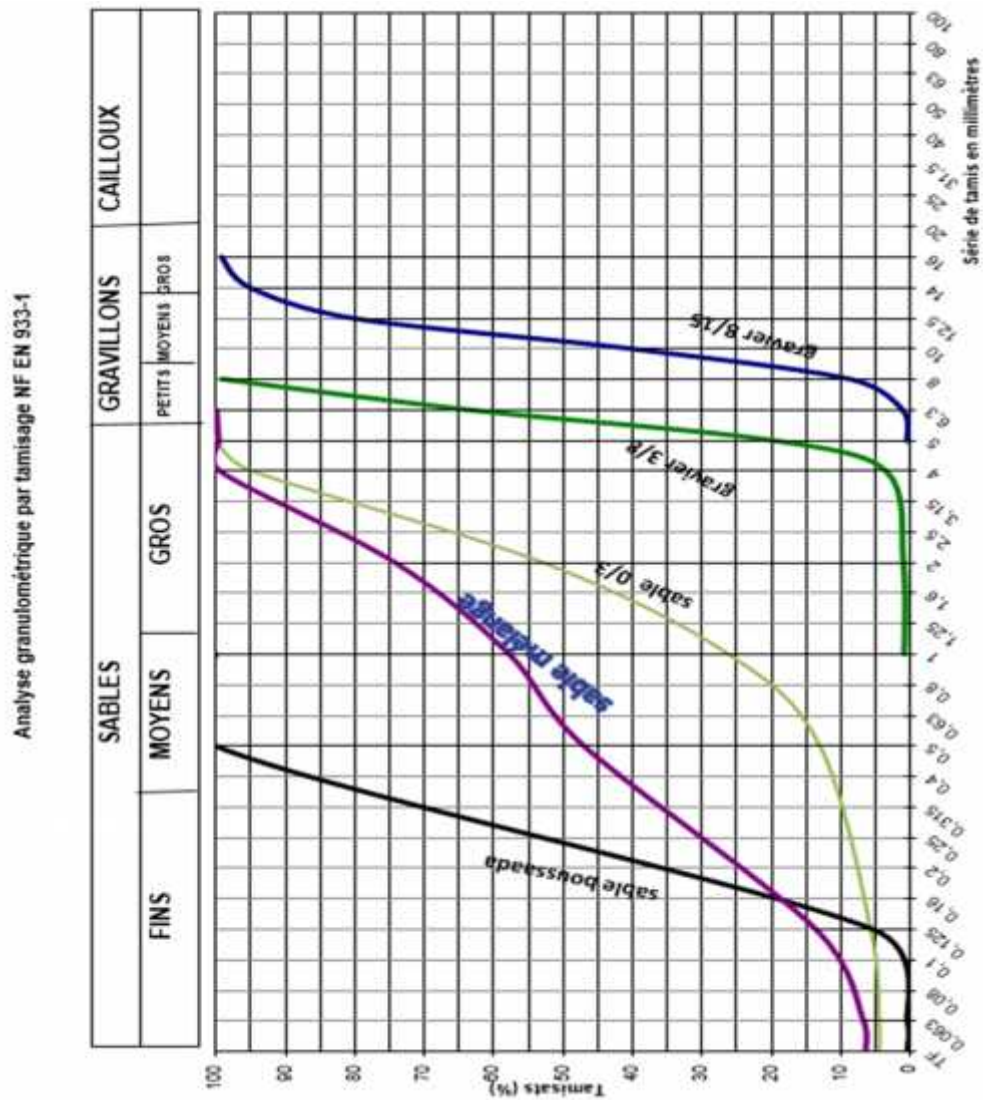


Figure II .1 : Courbe granulométrique

II.3.3. Adjuvant

L'adjuvant utilisé dans cette étude est le SIKA TOMPO12, de l'entreprise SIKA EIDJAZAIR, c'est un super plastifiant éther poly carboxylique pour la production de béton prêt à l'emploi de haute qualité avec faible rapport E/C et exceptionnelle ouvrabilité.

II.3.4. Calcul de la composition de béton « Méthode de Dreux-Gorisse » :

Les deux bétons étudiés sont des bétons avec deux classes de résistances :

- Résistance souhaitée à 28j = 40 MPa (Béton I, désigné par BI)
- Résistance souhaitée à 28j = 20 MPa (Béton II, désigné par BII)

L'ouvrabilité souhaitée : $A_C = 12 \text{ cm}$

$$F_{c28} = f_c + 15\%$$

$$F_{c28} = G f_{c28}(C/E - 0.5)$$

G : Coefficient granulaire donné par tableau I

F_{c28} : Classe vraie de ciment utilisé

$$C/E = 2.6 \text{ (B I)}$$

$$C/E = 1.8 \text{ (B II)}$$

$$C = 400 + \text{fluide (B I)}$$

$$C = 400 \text{ (B II)}$$

$$E = 153.8 \text{ L (B I)}$$

On trace sur le graphe, la courbe granulaire de référence « O A B ».

- Le point B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D max.

$$B = \begin{cases} X = 16 \text{ mm} \\ Y = 100\% \end{cases}$$

- Le point de brisure (A) a pour coordonnées :

- Abscisse : On a $D \leq 25 \text{ mm}$, donc

$$X = \frac{D}{2} = 8 \text{ cm}$$

- Ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D_{\max}} + K + K_p + K_s$$

K : terme correcteur que dépend du dosage en ciment, de l'efficacité de la vibration et de la forme du granulat (roulé ou concassé).

K_p : correction supplémentaire ; pour le béton pompable.

$$K_p = K + (5 \rightarrow 10) \text{ donc } K_p = 8$$

K_s : correction supplémentaire sur le sable ; si le module de finesse est différent à 0,12

$$K_s = 6 M_f - 15$$

$$K = -2, K_p = 8$$

$$\text{Donc : } Y = 52,12$$

$$A = (X, Y) = (8 ; 52.12)$$

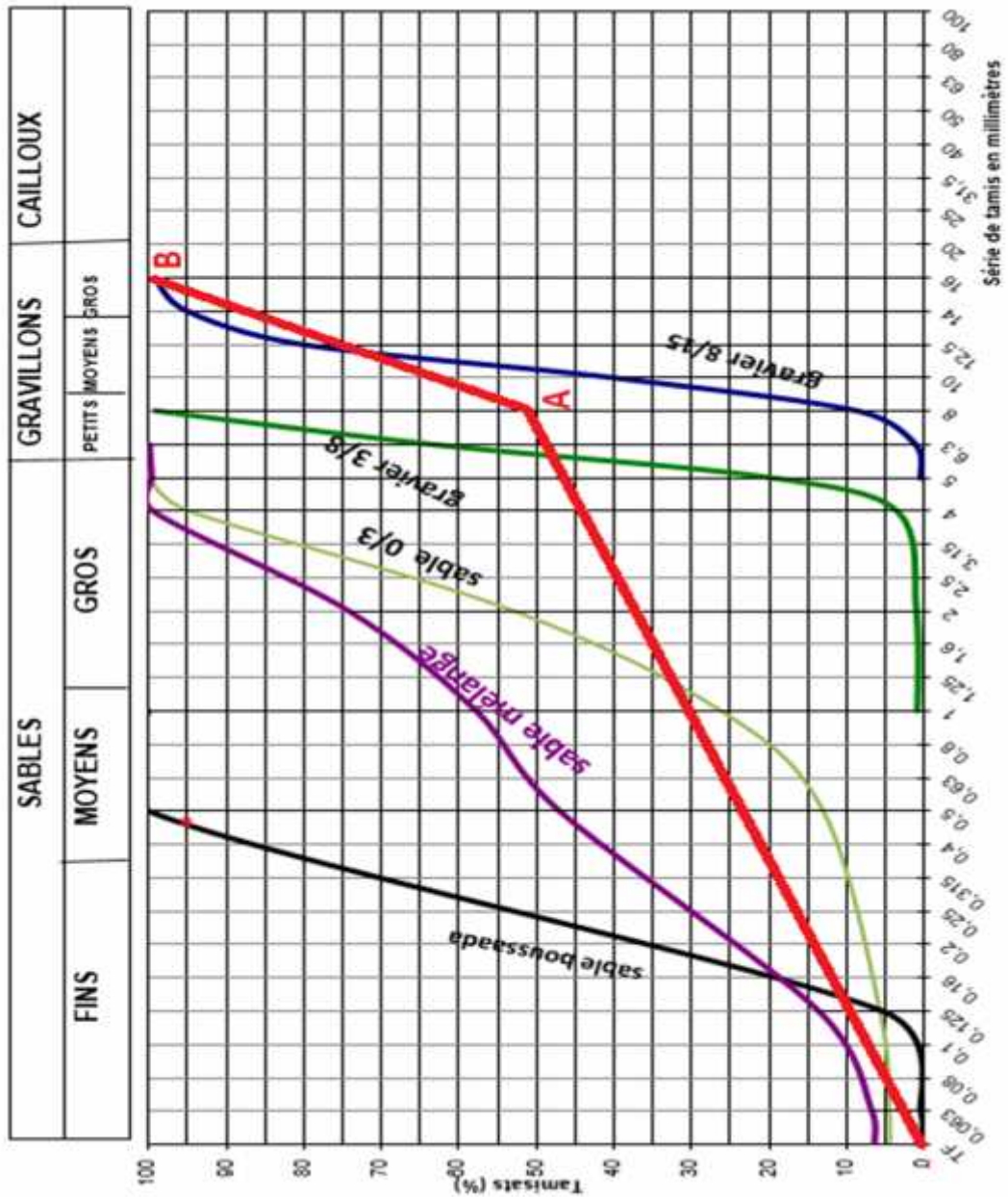


Figure II.2 : Les courbes d'analyse granulométrique par tamisage NF EN 933-1

Les pourcentages des constituants

D'après la courbe granulométrique on a :

- % de sable corrigé = 45 %
- % de $G_{3/8}$ = 6%
- % de $G_{8/15}$ = 49 %

-Calcul des masses des constituants :

$$\text{On a : } E/C = 0.38 \Leftrightarrow E = C \times 0.38$$

$$E = 152 \text{ Kg} \quad +4\%$$

$$E/C = 0.55 \Leftrightarrow E = C \times 0.55$$

$$E = 220 \text{ Kg} \quad +4\%$$

Le volume absolue de béton est : $V_{ab} = 1000 \times$

x : Valeur du coefficient de compacité (d'après le tableau);

$$x = 0.815$$

$$V_{ab} = 815 \text{ L}$$

-Le volume de ciment V_c :

$$V_c = \frac{M_c}{\rho_c}$$

$$V_c = 400 / 3.1 = 129 \text{ L}$$

$$V_c = 129 \text{ L}$$

-Le volume des granulats V_g :

$$V_g = V_{ab} - V_c$$

$$V_g = 672,2 \text{ L}$$

$$V_g = 686 \text{ L}$$

-Le volume de sable corrigé V_{Sg} :

$$V_{Sg} = V_g \times \% \text{ de sable}$$

$$V_{Sg} = 686 \times 0.45 = 308,5 \text{ L}$$

$$V_{Sg} = 308,5 \text{ L}$$

-Volume de sable (0/3) de Hachimiya V_{S1} :

$$V_{S1} = V_{Sg} \times \% \text{ de sable (0/3)}$$

$$V_{S1} = (308,5 \times 31) / 100 = 81,67 \text{ L}$$

$$V_{S1} = 95,67 \text{ L}$$

-Volume de sable de BOUSSAADA V_{S2} :

$$V_{S2} = V_{Sg} \times \% \text{ de sable (0/1)}$$

$$V_{S2} = (69 \times 308,5) / 100 = 212,8 \text{ L}$$

$$V_{S2} = 212,8 \text{ L}$$

-Volume de gravier 3/8 :

$$V_{3/8} = V_g \times \% G_{3/8}$$

$$V_{3/8} = 686 \times 0,06 = 41,13 \text{ L}$$

$$V_{3/8} = 41,13$$

-Volume de gravier 8/15 :

$$V_{8/15} = V_g \times \% G_{8/15}$$

$$V_{8/15} = 686 \times 0,49 = 336,37 \text{ L}$$

$$V_{8/15} = 336,14 \text{ L}$$

-Calcul en masse :

La masse = le volume x la masse volumique absolue

$$M_{0/1} = 95,67 \text{ L} \times 2,64 = 252,56 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{0/3} = 212,8 \text{ L} \times 2,69 = 572,43 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{G3/8} = 41,13 \text{ L} \times 2,68 = 110,2 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{G8/15} = 336,4 \text{ L} \times 2,67 = 898,18 \text{ kg/m}^3$$

La composition finale des deux bétons est présentée dans le tableau II.11

Tableau II.11 : Compositions des bétons

Kg/m³	Ciment	L'eau	Adjuvant %	E/C	Sable 0/1	Sable 0/3	Gravie 3/8	Gravie 8/15
Béton I	400	158	1 %	0.35				
Béton II	400	229	/	0.55	252.56	572.43	110.2	898.18

II.3.5. Propriétés des bétons formulés

II.3.5.1. Bétons frais

Un essai d'affaissement au cône d'Abrams est réalisé selon la norme **NF P18-451**.

L'affaissement des deux bétons est donné dans le tableau *II.12*

Tableau II.12: Affaissement de béton frais

Béton	Affaissement
Béton (I)	12cm
Béton (II)	10cm

*Figure II.3: Essai au cône d'Abrams*

II.3.5.2. Bétons durcis

Le béton est caractérisé par sa résistance en compression et sa résistance en traction, les éprouvettes normalisées pour l'essai de compression sont de type cylindrique de hauteur (320mm) et de diamètre (160mm) (selon la norme NF EN12390-4) et des éprouvettes prismatiques (7cm*7cm*28 cm), comme illustré dans la figure II.4

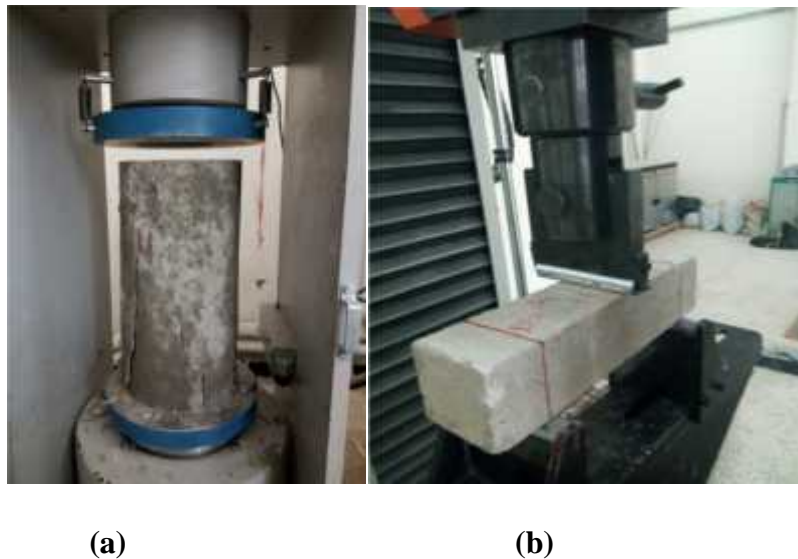


Figure II.4. Mode d'essai : a)compression, b) traction par flexion trois points

Les résultats des essais mécaniques, sont présentés dans le tableau II.14

Tableau II.14 : Résistances à la compression et à la flexion

	Résistance à la compression 28j (Mpa)	Résistance à la traction par flexion 3p 28j (Mpa)
Béton (I)	42	6.5
Béton (II)	21	3.5

V.6.1. Armatures

Les poutres sont renforcées par deux types d'armatures : armature inférieure (2HA10) et armature supérieure (2HA8). L'enrobage des poutres est de 25 mm. Les cadres utilisés sont fabriqués à partir de barres d'acier doux avec un diamètre de 6 mm ; ils sont espacés

de 5 cm en appui et de 10 cm en travée. Les valeurs des caractéristiques mécaniques de l'acier sont présentées dans le tableau II.15. La figure II.5, montre la géométrie, les dimensions et les détails de ferrailage.

Tableau II.15 : Propriétés mécaniques de l'acier [30]

	f_e (MPa)	E_s (GPa)	ν
HA8	450	210	0.3
HA10	450	210	0.3
$\Phi 6$	250	210	0.3



Figure II.5 : ferrailage des poutres testées

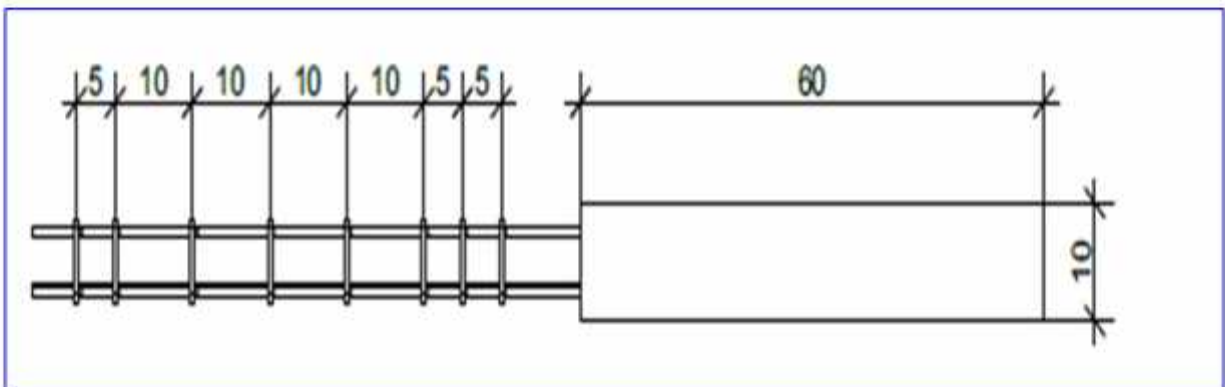


Figure II.6 : schéma de ferrailage de poutre

II.3.7. Matériaux de réparation

Les poutres en béton armé pré-fissuré (après l'endommagement) ont été réparées par deux types de composite, un tissu de fibres de verre (GFRP), un tissu de fibres de carbone (CFRP) et une résine d'imprégnation époxydique.

II.3.7.1.fibre de carbone

Le fibre utilisée dans cette étude est **Le SikaWrap-230 C/45** : commercialisés en Algérie par **SIKA ELDJAZAIR** est un tissu unidirectionnel de renforcement de structures, à base de fibres de carbone, applicable « à sec » (sans imprégnation préalable) présentée dans la figure II.7 [25].

Les caractéristiques de tissu de fibre de carbone sont présentées dans le tableau (II.16)

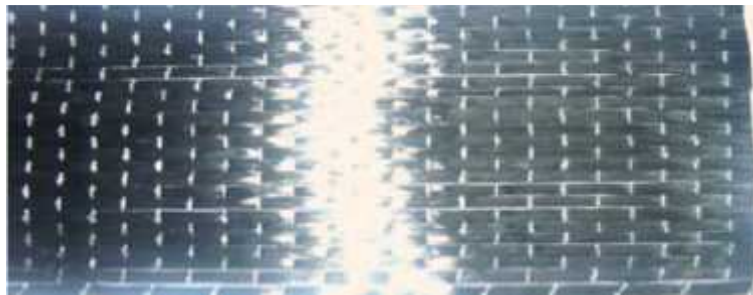


Figure II.7 : tissu mono directionnelle (SikaWrap)

II.3.7.2.fibre de verre

Ont a utilisée Le tissu de fibre de verre de type R : pour les composites hautes performances ; est un tissu de renforcement de structures, à base de fibres de verre, d'un texture **Toile ou taffetas** : Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement présentée dans (figure II.8)

Tableau II.16 : Caractéristique technique des tissus [30]

	Module E (Gpa)	Résistance Traction (Mpa)	Charge ultime (Mpa)	Epaisseur (mm)	Elongation (%)
Tissu Verre GFRP	5.85	108.94	124. 5	1.64	2.66
Tissu Carbone CFRP	25.45	184	180.75	1.25	0.66%

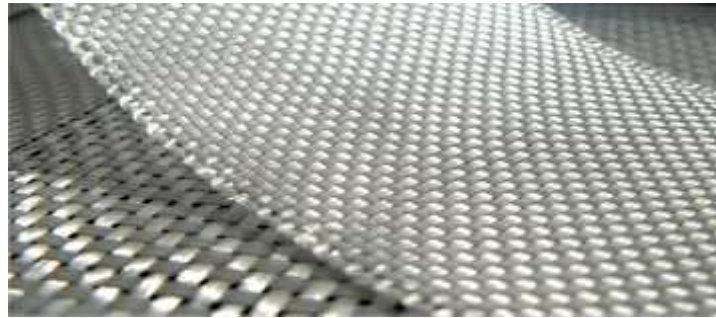


Figure II.8 : Tissu toile de fibre de verre

II.3.7.3.La résine

La résine qu'on a utilisé dans cette étude est la Sikadur®-330 commercialisés en Algérie par **SIKA ELDJAZAIR** est une résine d'imprégnation époxydique, thixotrope à deux 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 de plaques de renforcement. Figure II.9

II.3.7.4Caractéristiques du composite (tissu+ résine)

Epaisseur du composite testé : 1 mm (imprégné avec Sikadur®-330).

Charge ultime : 350kN/m de largeur.

Module d'élasticité en traction : 25kN/mm², [26].



La figure II.9 : Sikadur ®330 composant A : 4kg de colle (blanche). Composant B : 1kg de durcisseur

II.4. Description des poutres testées

Dans cette étude expérimentale de réparation des éléments en béton armé endommagés, deux classes de béton ont été étudiées. Les poutres de la première classe correspondent à un béton de 21 MPa, alors que celles de la deuxième à un béton de 42MPa. Chacune des classes comporte 3 poutres témoin et 9 pré-fissurées et réparées.

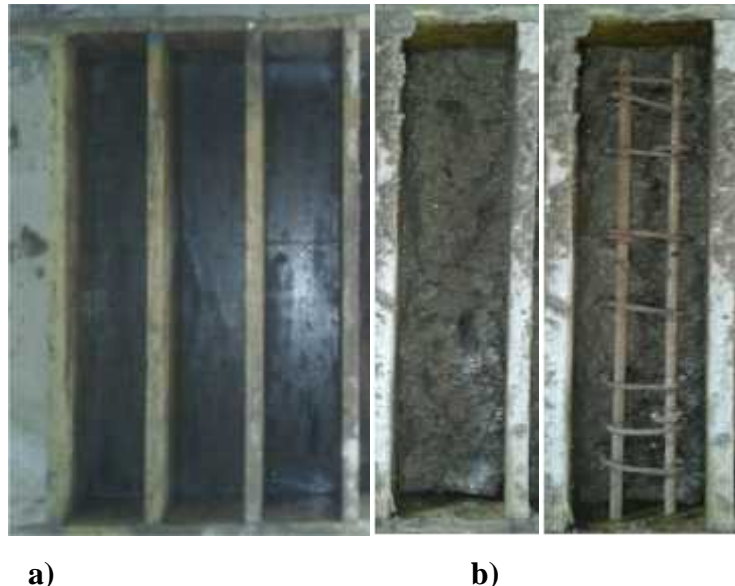
Au total, vingt-quatre (24) poutres de dimensions identiques de section (10*15) cm² et une longueur de 60cm, ont donc été fabriquées à l'aide de deux (2) mélanges de béton.

II.4.1. Procédure de mise en œuvre des poutres

-Préparer des moules par graissage avec un agent démoulant

-Le malaxage du béton au début on a fait le malaxage a sec de sable, gravie et ciment pendant 15s en ajouter $\frac{3}{4}$ d'eau et continuer le malaxage durant 3 min après le malaxage, on remplit les moules en deux couche ; ont appliquent la première couche après en mais l'armature et ont appliquent la 2eme couche, on arase et la surface de la poutre. Tout les poutres ont été misé en murissement, dans des bacs d'eau à une température T=20°C pendant 28j selon la norme européenne (NF2001).

Les étapes de la mise en œuvre sont présenté (la figure II 10 et II.11)



a) **b)**
*Figure II.10 : Préparation des spécimens:
a) préparation des moules, b) remplissage des moules.*



Figure II.11 : Murissement les poutres dans des bacs.

II.5. Notation des poutres testées

Vingt quatre (24) poutres en béton armé de section (150*100) mm² avec une longueur de 600mm, ont été confectionnées, ces poutres sont désignées comme suit :

- Six (6) poutres en béton armé témoins, trois en béton (I) et trois en béton (II).
- Dix-huit (18) poutres en béton armé (9 pour le BI +9 poutre pour le BII), pré-fissurées et réparées par le collage des tissus de fibres de verre, fibres de carbone ou les deux (hybride), ces poutres ont été divisées en trois (3) séries selon la configuration géométrique de réparation
 1. Série A: Six (6) poutres (3 BI +3 BII), réparées par une bonde de tissu de fibre de carbone (CFRP) (100 x 480) mm² sur la surface inférieure seulement.
 2. Série B: Six (6) poutres (3 BI) +3 BII), réparées par une bonde de tissu de fibre de carbone (CFRP) (100 x 480) mm² sur la surface inférieure et des bondes droites (50x100) mm² en tissu de fibre de verre (GFRP) collées sur les deux cotés, avec un espacement entre les bondes.
 3. Série C: Six (6) poutres (3 BI +3 BII), réparées par une bonde de tissu de fibre de carbone (CFRP) (100x480)mm² collée sur la surface inférieure et des bondes inclinées (50x220)mm²

à 45° en tissu de fibre de verre (GFRP), collées sur les deux cotés avec un espacement entre les bandes. Les différentes configurations de réparation des poutres, sont présentées dans la figure III.15 et la notation des différentes variantes des poutres étudiées sont regroupées dans le tableau III.13.



a) Poutre de série A



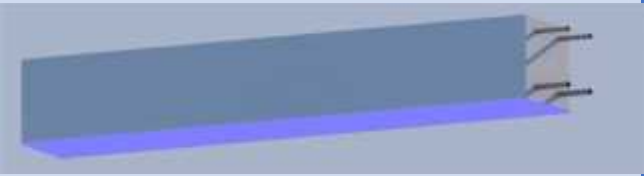

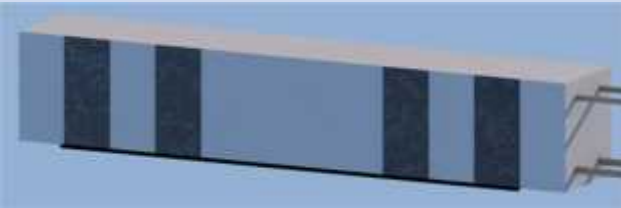
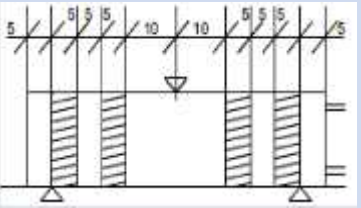

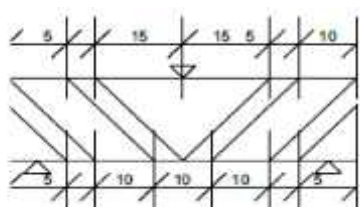
b) Poutre de série B



c) Poutre de série C

Figure II.12 : Configurations géométriques de réparation des poutres

Tableau II.17 : Notation des poutres

	Béton II BII	Béton I BI	Configuration	Zone bas	Deux cotés	Shéma d' emplacement de renfort
Poutre de référence	PT2	PT1		/	/	/
Poutres Réparées Série A	P2C	P1C		Bande (10x48) cm ² en CFRP	/	
Poutres Réparées Série B	P2CVD	P1CVD		Bande (10x48) cm ² en CFRP	(4) bondes droites (5x15)cm ² en GFRP	
Poutres Réparées Série C	P2CVI	P1CVI		Bande (10x48) cm ² en CFRP	(4) bondes (5x22)cm ² incliné à 45° en GFRP	

II.6. Procédures d'essais (essai de flexion)

La résistance à la traction par flexion a été déterminée à l'aide d'une machine de flexion 3 points, de type ELE. IBERTEST de capacité de 200KN, Le chargement a été appliqué en termes de contrôle de déplacement à une vitesse (0.5KN/S). La flèche à mi-portée est mesurée au moyen de capteur automatique dans la machine (Figure II.13 et II.14). Les poutres ont été disposées dans la machine d'essai après un centrage parfait et la portée libre des poutres était de 500mm. Les valeurs de la force verticale et le déplacement correspondant ont été enregistrés simultanément.

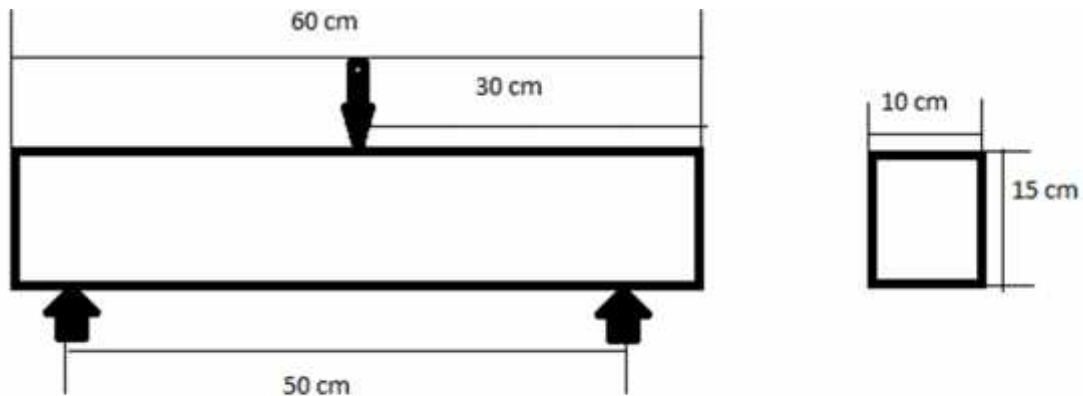


Figure II.13 : Schéma de la disposition de la poutre sur la machine d'essai



Figure II.14 : Machine d'essai de flexion (ELE. IBERTEST)

II.6. 2. Essai de flexion des poutres en bétons :

Après 28j de durcissement, les poutres sont testées sous chargement de flexion 3 point jusqu'à la rupture. La première série d'essais comporte 6 poutres non renforcées considérées comme poutres de références: 3 poutres en béton I et 3 poutres en béton II. Les résultats sont présentés dans le tableau II.18. Les courbes force/flèche à mi-travée des poutres de références sont données dans la figure (II.15).

Tableau II.18: résultats des essais de la première série d'essais de flexion

Poutres		Charge ultime (KN)		Flèche à la rupture (mm)
Poutres en Béton I PT1	P1	79.20	80	7
	P2	80.62		
	P3	80.20		
Poutres en Béton II PT2	P1	49	51.5	7
	P2	51		
	P3	54.5		

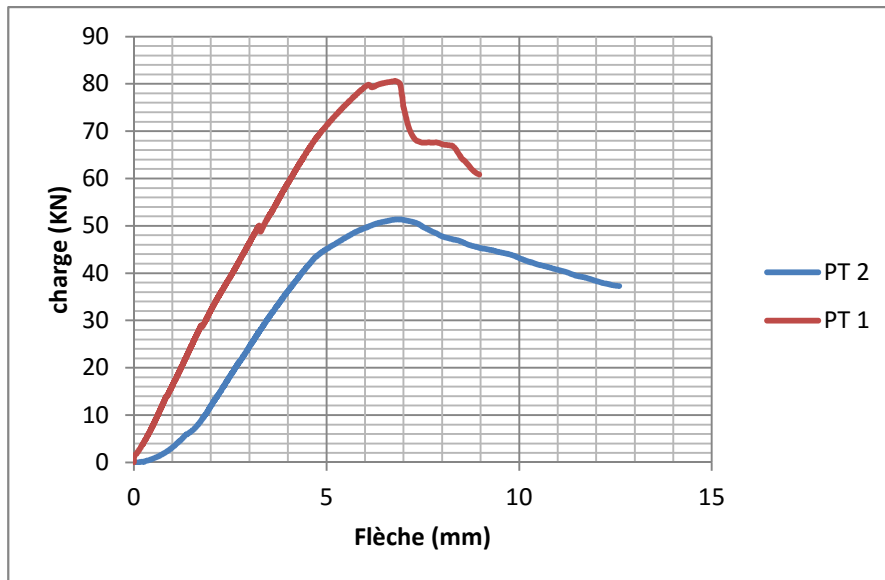


Figure II.15: Courbe charge-flèche des poutres témoins

Les courbes force-flèche, présentent trois phases:

Une phase de béton armé non fissuré, où la flèche croît linéairement avec la charge. Cette phase s'étend jusqu'à 45kN pour la poutre PT1 et 30KN pour la poutre PT2 avec l'apparition des fissures fines verticales ascendantes (due au moment fléchissant), la flèche atteinte est d'environ 3 mm pour TP1 et d'environ 4.5 mm pour PT2.

- Une phase de béton armé fissuré, linéaire-parabole où on peut constater l'apparition des fissures inclinées à $F=60$ KN pour PT1, avec une flèche de 4.5 mm environ, pour la PT2 l'apparition des fissures inclinées a partir de 38 KN avec une flèche de l'ordre de 5 mm.

- Une phase de béton armé fissuré plastique, après la plastification des aciers, on note une nette augmentation de la profondeur et de la propagation de l'ouverture des fissures inclinées. Pour la poutre PT1, la flèche mesurée est de 7mm et la charge de rupture (par flexion et cisaillement) est de 81KN et pour la poutre PT2, la charge est de 51KN tandis que la flèche de rupture est de 7 mm.

II.6. 3.Pré-fissuration des poutres

Généralement, à 50% de la charge de rupture, des fissures verticales dues au moment fléchissant se apparaître sur la surface de la poutre, puis a une charge d'environ 65% à 70% de la charge de rupture, deux macro-fissures principales symétriquement disposées de part et d'autre de l'axe central des poutres due à l'effort tranchant se développent.

L'objectif de l'essai de pré-fissuration, est de créer une fissuration développée et uniforme dans les poutres, pour cela les dix-huit (18) poutres destinées à la réparation sont soumis à une charge d'environ 70% de la charge de rupture en flexion jusqu'à la fissuration dense (jusqu'à l'apparition des fissures inclinés (figure II.16) Selon les normes de l'Eurocode 2 (EC2, 2002), la charge appliquée sur les poutres pour la pré-fissuration est de l'ordre de 63% à 70% de la charge de rupture.

Le tableau (II.119) présente les charges de rupture des poutres de références et les charges appliquées pour leurs pré-fissurations. (Figure II.16)

Tableau II.19 : Valeurs de la charge de pré-fissuration

	Poutre	Charge ultime (KN)	Charge de pré-fissuration 70% de la charge ultime (KN)
Poutres en Béton (I)	P1	80.2	52.5
	P2	80.6	
	P3	79.8	
	Moyen	80.2	
Poutres en Béton (II)	P1	49	36.3
	P2	51	
	P3	54.5	
	Moyen	51.5	

*Figure II.16 : Poutre pré-fissurée*

II.7. Réparation des poutres

Les poutres pré-fissurées ont été réparées par le collage de tissu en fibres de verre ou fibres de carbone ou les deux (hybride), avec différentes configuration géométriques à l'aide d'une résine époxydique SIKA DUR 330.

La réparation est réalisée selon les étapes suivantes :

a) Traitement de la surface de béton

Le traitement de la surface devant recevoir le renfort en CFRP a fait l'objet d'une attention particulière, eu égard aux éventuels problèmes de décollement, particulièrement le fait qu'il s'agit d'un chargement dynamique. Les supports en béton et en maçonnerie doivent être préparés mécaniquement par sablage ou par ponçage (au disque diamanté), afin d'éliminer la laitance de ciment, les particules friables non ou peu adhérents, et d'ouvrir la porosité de surface [8].

Avant l'application du Sikadur®-330, toutes les poussières et autres particules non ou peu adhérentes doivent être complètement éliminées du support de préférence par brossage puis par aspiration mécanique [26].

A cause de manque de matérielle de sablage au laboratoire, ont a fait la préparation de surface par utilisation de méthode classique par utilisation de marteau et une brousse métallique, Le résultat de ce traitement est indiqué à (figure II.17)



Figure II.17 : la préparation de la surface de la poutre

b). Préparation du tissu

On découpe soigneusement le tissu aux dimensions indiquées. Le tissu une fois coupé, doit rester soit à plat, soit enroulé loin de la poussière et à l'abri de l'humidité.

c) Préparation de la résine Sikadur 330

On homogénéise chaque composant séparément dans son emballage.

On verse une quantité du composant B (1/4) de quantité versé de composant A dans un récipient propre.

On mélange avec un agitateur mécanique muni d'une hélice pendant environ 3 minutes jusqu'à obtenir un mélange uniforme de couleur grise.

On transvase l'ensemble du mélange dans un récipient propre, puis on mélange à nouveau pendant environ une minute, à faible vitesse (300 tours/minute environ) afin de limiter l'entraînement d'air. [26]. (Figure II.18)



Figure II.18: préparation de la résine :

(a) Composant (B) 1/4 masse de quitte. (b) Composant (A) masse de 3/4de quitte.

d). Application de la résine Sikadur 330 et du tissu SikaWrap HEX 230 C

Sur le support béton (partie tendue de la poutre) préalablement préparé, on applique, à l'aide d'un rouleau ou d'une brosse, le SIKADUR 330 à raison de 0.7 à 1.2 kg/m² suivant la rugosité de support béton (figure II.19)



Figure II.19: application de la première couche de colle sur la poutre

On place le tissu sur la couche de résine conformément au dimensionnement voulu. On applique soigneusement une pression sur l'ensemble tissu et résine avec le rouleau de marouflage. On répartit la résine avec ce rouleau jusqu'à l'obtention d'une structure homogène. (Figure II.20)



Figure II.20: l'emplacement de tissu SikaWrap HEX 230 C sur la poutre

d).2. Application de la résine et le tissu de verre®

Appliquer le Sikadur®-330 sur les deux cotés de la poutre préparée à l'aide d'une truelle ou d'un rouleau.

Positionner le tissu en fibres de verre sur les deux cotés de la poutre Préparé

Avant l'application, contrôler l'humidité du support, l'humidité relative et le point de rosée. Couper le tissu SikaWrap® aux dimensions désirées.



Figure II.21 : positionnement de fibre de verre sur la poutre

Sans attendre, placer et positionner le tissu dans le sens adéquat conformément aux indications, Maroufler le tissu sur la couche de résine à l'aide du rouleau marouffleur afin que la résine traverse et imprègne uniformément toute la surface du tissu de verre ®, Cette opération se réalise aisément, sans forcer, dans le sens longitudinal des fibres, de façon à évacuer l'air éventuellement emprisonné, sans créer de faux plis, ni déformer le tissu. Lisser la surface à l'aide d'une large brosse pour homogénéiser la surface du composite ainsi réalisé [26].

Les étapes sont illustrées sur la figure(II.22)



Figure II.22 : application de fibre de verre ® sur la poutre

II.8. Résultats et discussion

Dans cette partie, les résultats sont présentés sous forme de courbes charge/flèche, chaque mode de réparation va être comparé avec les poutres de références (non réparées). Les valeurs des résultats présentés dans cette partie sont la moyenne de trois valeurs.

II.8.1. Béton I

Série A : Poutres réparées par une bande de tissu de carbone (10x48) cm sur la surface tendu de la poutre (P1C)

Les résultats illustrés dans la figure (II.23) montrent que les deux courbes sont compatibles entre elles, Les trois phases observées avec les poutres témoins sont aussi observées avec les poutres réparées (P1C). l'apparition des fissures inclinées à $F=68\text{KN}$ et une augmentation de la charge de rupture de 80KN à 88KN avec un gain de 10% de la charge, le déplacement à la rupture à la même valeur à celle de béton témoin 7cm , aucune fissure verticale apparaitre sur la poutre ceci peut être expliqué par la réparation par bande de carbone sur la face inférieure de la poutre qui empêche l'apparition et le développement des fissures dues aux sollicitations de flexion. La présence de TFC en face tendue augmente la résistance au moment fléchissant. Pour cette raison, la rupture de poutres renforcées (P1C) n'est plus due au moment fléchissant, mais provoquée par l'effort tranchant figure (II.24)

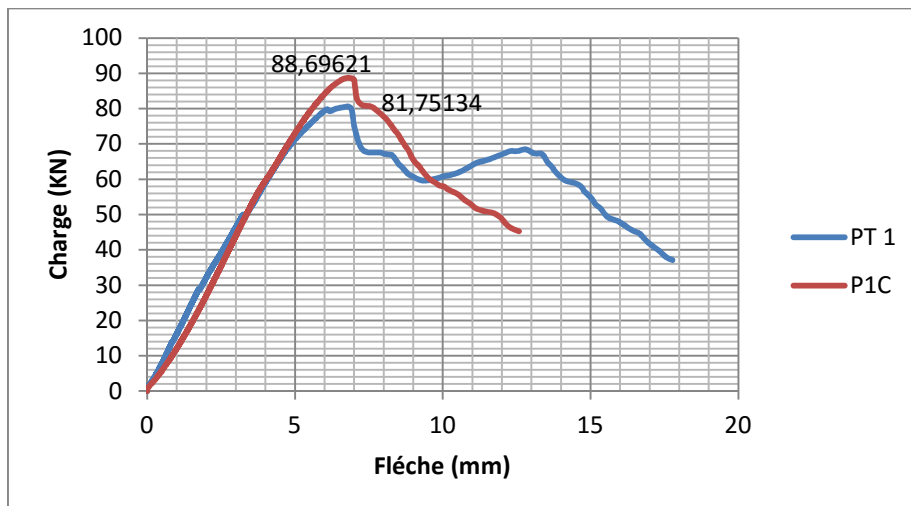


Figure II.23 : Comparaison des courbe force / flèche entre la poutre réparé (P1C) Et la poutre témoin(PT1)



Figure II.24 : rupture de poutre (PIC) par cisaillement

Série B (P1CVD): Poutre renforcé par une bonde de tissu de carbone (10x48) cm² sur la surface tendue de la poutre, et des bondes droites (5x15) cm² en tissu de verre sur les parois verticales (P1CVD) :

La poutre de type (P1CVD), présente un comportement proche ou poutre de référence, les trois phases sont observées.

Durant la première phase aucune fissure n'apparaît, Durant la deuxième phase on remarque l'apparition de fines fissures inclinées sur les deux côtés après un chargement de 80kN au lieu de 68kN pour la poutre témoin. Cela peut s'expliquer par la résistance de tissu de verre à l'effort tranchant. Les deux fissures inclinées se propagent lentement par rapport au témoin, ces deux fissures tendent à s'incliner vers le point d'application de la charge, aucune fissure verticale n'est observée (reprise des efforts par le tissu de carbone). La rupture est observée à une charge moyenne de 108kN, par un décollement de la bonde de verre, une amélioration de 35 % de la charge de rupture à été observé, le déplacement à la rupture est de 6.3mm avec une réduction de 10%. Cette observation peut se justifier efficacement de la méthode de réparation par le renfort hybride (carbone, verre).

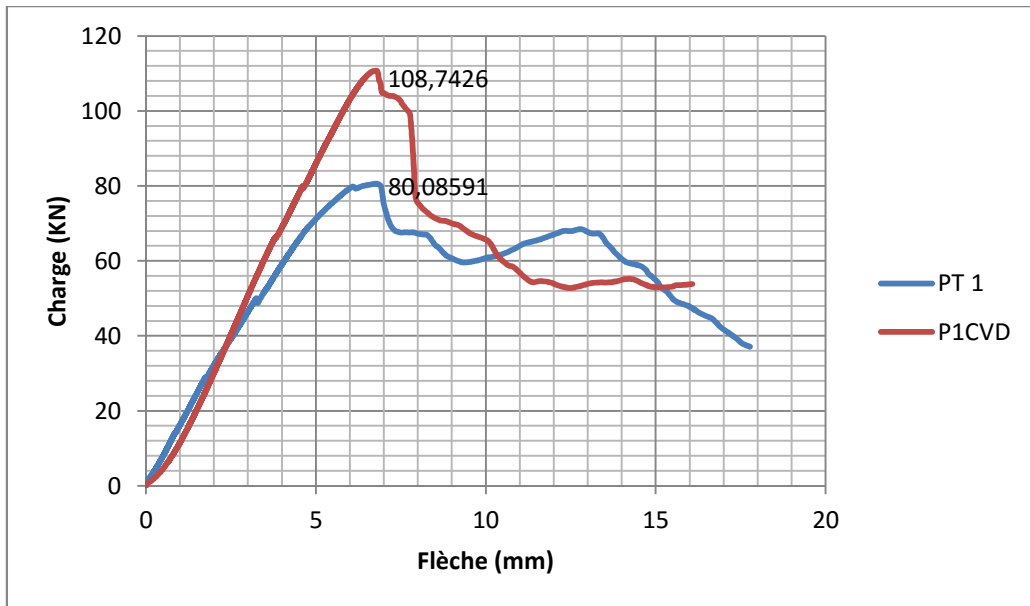


Figure II.25 : Comparaison des courbe force / flèche entre poutre réparé(P1CVD) et poutre témoin (PT1).



Figure II.26 : mode de rupture de poutre (P1CVD) arrachement des bandes puis rupture par cisaillement

Série C (P1CVI) : Poutre réparé par une bonde de tissu de carbone (10x48) cm² sur la surface tendue de la poutre, et des bondes inclinés (5x22) cm² en tissu de verre sur les parois verticales (P1CVI).

Pour ce cas de réparation, on remarque que, jusqu'à une charge de 60 kN aucune fissure n'apparaît et la poutre reste presque intacte. Par ailleurs les déformations du béton et les flèches sont minimales.

À une charge de 95 kN, le début d'apparition de fines fissures inclinées sur les deux côtés, mais aucune fissure verticale n'apparaît (reprise des efforts par la lamelle et le tissu). Les deux fissures inclinées se propagent en profondeur et en largeur.

La rupture est observée à une charge de 119 kN par effort tranchant avec un gain d'environ 48.7% par rapport aux poutres de référence. Le déplacement à la rupture est de 5 mm soit une diminution de 28%, comparé avec le déplacement de poutre témoin, cela peut être expliqué par la résistance au l'effort tranchant acquise par les bandes de fibres de verre. La rupture se fait simultanément par cisaillement (effet de l'effort tranchant) avec des fins fissures, et avec un décollement du tissu de verre (décollement de bande incliné) (figure II.27)

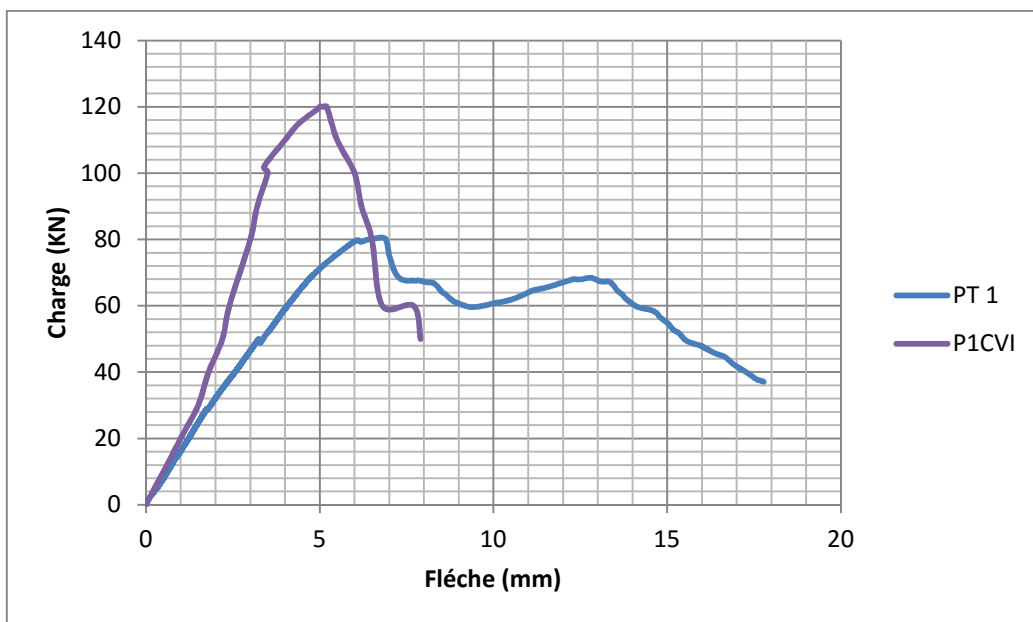


Figure II.27 : Comparaison des courbe force / flèche entre poutre réparé(P1CVI) et poutre témoin (PT1).



Figure II.28 : *Mode de rupture des poutres (PICVI) Décollement de la résine du tissu et rupture par cisaillement*

II.8.2. Comparaison des trois modes de réparation des poutres

La figure. (II.29, II.30) présente les courbes comparatives force flèche des différents modes de réparation. Cette figure montre l'effet bénéfique de la réparation sur la diminution de la flèche et l'augmentation de la capacité portante des poutres réparées ainsi que le mode de rupture.

La comparaison des courbes de comportement global amène les remarques suivantes :

- Tout les modes de réparation qui sont appliqués présentent une amélioration de la valeur de charge de rupture supérieur à celle de poutre témoin et une réduction de la flèche à la rupture, ce qui prouve l'efficacité de la réparation à l'aide de PRF.
- La poutre (PICVI), présente le meilleur comportement, avec une charge ultime égale à 119 KN (48.75%) de gaine par rapport au témoin, la flèche correspondante est égale à 5.2mm, soit une diminution de (28%).
- La poutre (PICVD) lui-même présenté un comportement proche de la poutre (PICVI) avec une charge ultime de 110 KN (32,5%) et une flèche 6.3mm (10%)
- La poutre (PIC) réparée avec le tissu de carbone sur la face inférieur seulement présenté un gain de charge de 10% et la même flèche avec la poutre témoin (PT1), la comparaison entre ces résultat est les résultats présidant indique clairement l'efficacité de la réparation par des bonde de carbone collées sur la face inférieure. La présence de TFC en face tendue

augmente la résistance au moment fléchissant. Pour cette raison, la rupture des poutres courtes réparées n'est plus due au moment fléchissant, mais provoquée par l'effort tranchant.

Le tissu composite en face tendue ne contribue pas à la reprise de l'effort tranchant, tandis que les bandes de tissu ont joué le rôle d'étriers et ont aidé ceux existants (internes) à reprendre les sollicitations de cisaillement (effort tranchant)

les poutres (P1CVD) et (P1CVI) ont une amélioration de la charge de rupture et de déplacement à la rupture par rapport au (P1C) (bondes sur la face tendue seulement), ce qui montre la contribution des bandes de verre à la reprise d'effort tranchant.

Les modes de ruptures des trois modes de réparation sont toujours liés ou sollicitations de cisaillement (effort tranchant), avec une différence dans la profondeur et la largeur des fissures

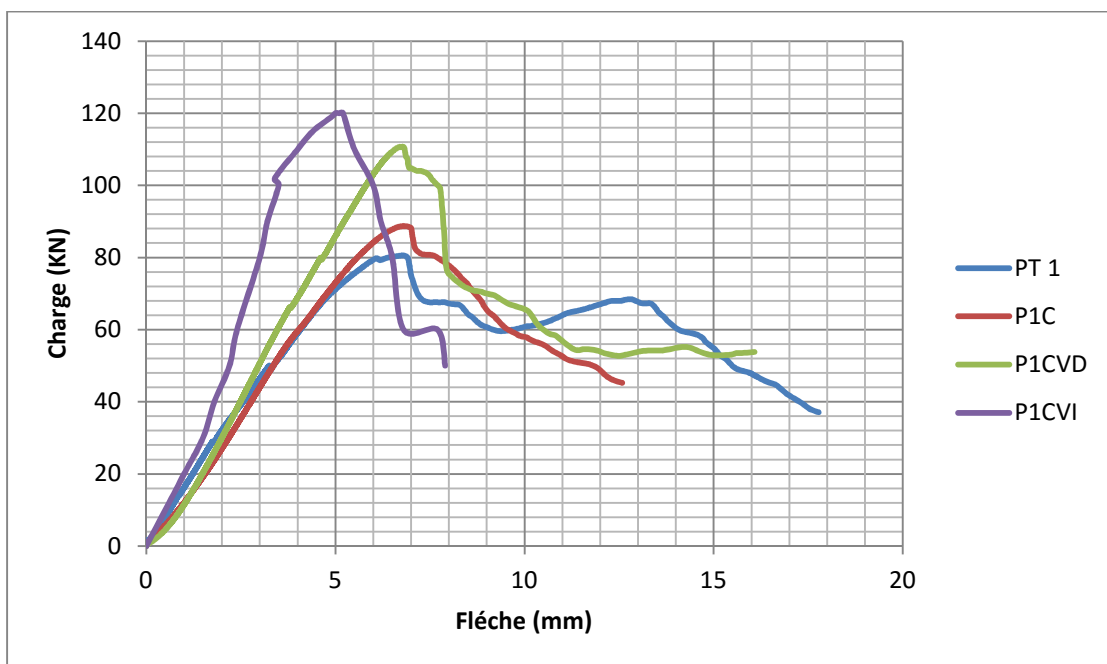


Figure II.29 : courbe de comparaison charge/flèche entre les 3 types de réparation (P1C, P1CVD, P1CVI) et la poutre témoin (PT1).

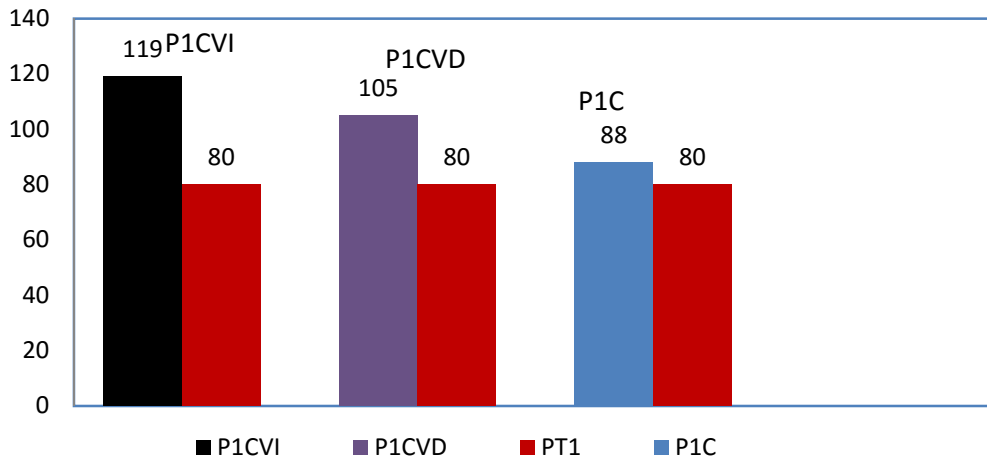


Figure II.30 : Comparaison des forces ultimes de poutres réparées avec la poutre témoin de béton I

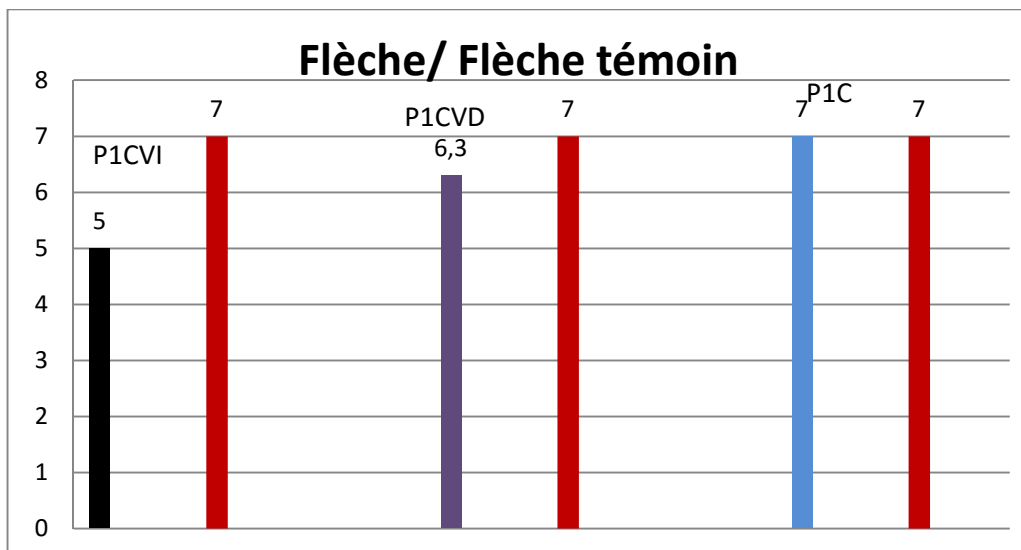


Figure II.31 : comparaison des flèches à la charge ultime de poutres réparées avec la flèche de poutre témoin béton I

II.8. 3.Courbe charge/flèche des poutres en béton II

Série A (P2C)

A partir de la figure II.32, les deux poutres (P2C) et (PT2) présentent un comportement similaire, avec une amélioration de 19% en charge ultime de la poutre réparée par rapport à la poutre de référence, La flèche à la rupture est de 5 mm soit une diminution de 28%. Le mode de rupture observé pour ce type de réparation est la rupture par cisaillement avec un

décollement de tissu à l'extrémité et une compression de béton dans le point d'application de la charge (figure II.32).

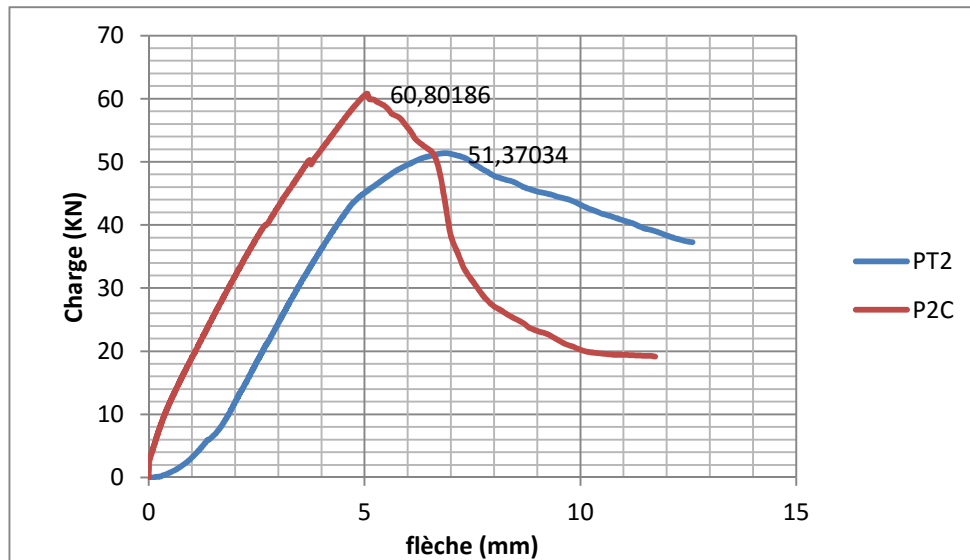


Figure : II.32: Comparaison des courbe force / flèche entre poutre réparé(P2C) et poutre témoin(PT2)



Figure II.33 : poutre (P2C) compression de béton, délaminage de la bonde et rupture par cisaillement

Série B (P2CVD)

Les résultats obtenus (figure II.34), montrent que la poutre réparé (P2CVD), a une force de rupture supérieures par rapport à la poutre témoin le gain de la charge de rupture elle est de l'ordre 20% et une réduction de la flèche à la rupture remarquable elle est de l'ordre 34%. Au cours de l'augmentation de la charge, deux macro-fissure apparaissent systématiquement au niveau des appuis, placés symétriquement à 25cm du centre de la

poutre en présence de l'effort tranchant, ces deux fissures tendent à s'incliner vers le point d'application de la charge avec un décollement de tissu de la face tendue à l'extrémité (voir figure II.35).

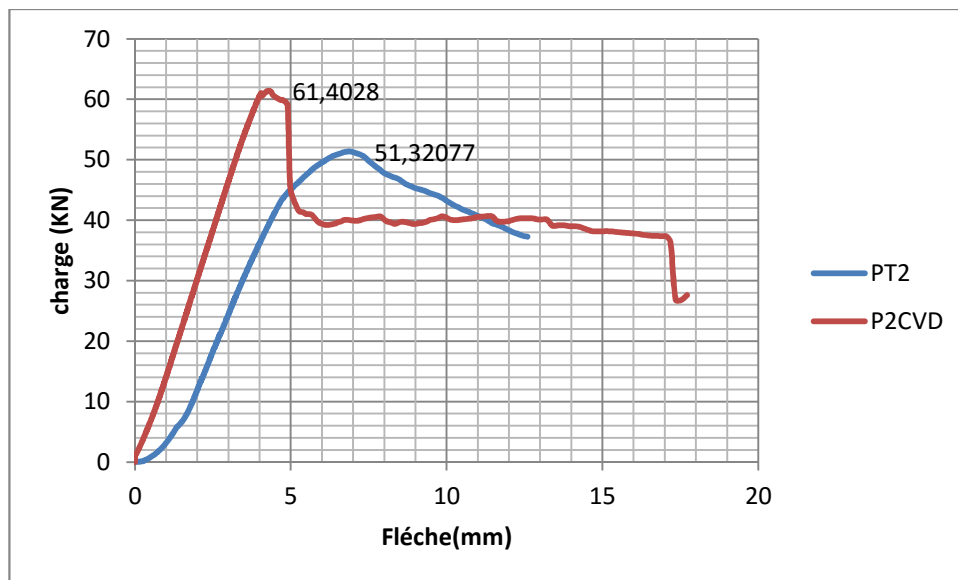


Figure II.35 : Comparaison des courbe force / flèche entre poutre réparé(P2CVD) et poutre témoin (PT2).



Figure II.36 : Poutre P2CVD décollement du bande GFRP puis rupture par cisaillement

Série 3 (P2CVI)

Les résultats obtenus dans la figure (II.37), montrent que la poutre réparée (P2CVI) a une force de rupture supérieures par rapport au poutre témoin, le gain de la charge de rupture est de l'ordre 56% avec une réduction de la flèche à la rupture remarquable, il est de l'ordre de 42%, ceci peut être expliqué par les bandes de verre formes inclinées qui vont

limiter la propagation des fissures inclinées et résistent au cisaillement ainsi a la présence de tissu de carbone sur la face inférieur afin de limité les fissures due au moment fléchissant.

La rupture est toujours faite par cisaillement, le renfort composite s'est décollé dans la zone où les fissures diagonales sont apparues figure II.38.

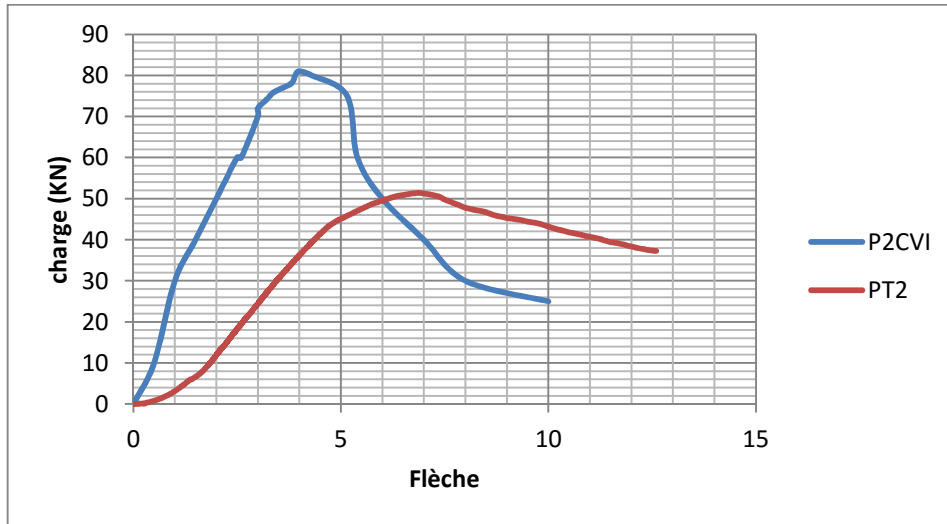


Figure II.37 : Comparaison des courbe force / flèche entre poutre réparé(P2CVI) et poutre témoin (PT2).



Figure II.38 : mode de rupture de poutre (P2CVI) par cisaillement décollement de composite

II.8.4. Comparaison des trois modes de réparation des poutres en béton II

Les résultats des figures II.39 et II.40 et II.41, montrent une amélioration de la charge de rupture et de la flèche à la rupture des poutres réparées par rapport ou poutre témoin cette

amélioration varie entre 19%,20% jusqu'à 56% et pour les charge et de 28% ,34% jusqu'à 42% pour la flèche en fonction de type de renfort utilisé dans la réparation.

L'amélioration de la charge de rupture des poutres (P2CVI) réparées par composite hybride (carbone et verre) par rapport ou poutres (P2C) réparées seulement dans la face inférieure est de l'ordre de 33%. Cette amélioration est liée au renforcement des faces latérales avec les bandes en fibres de verre.

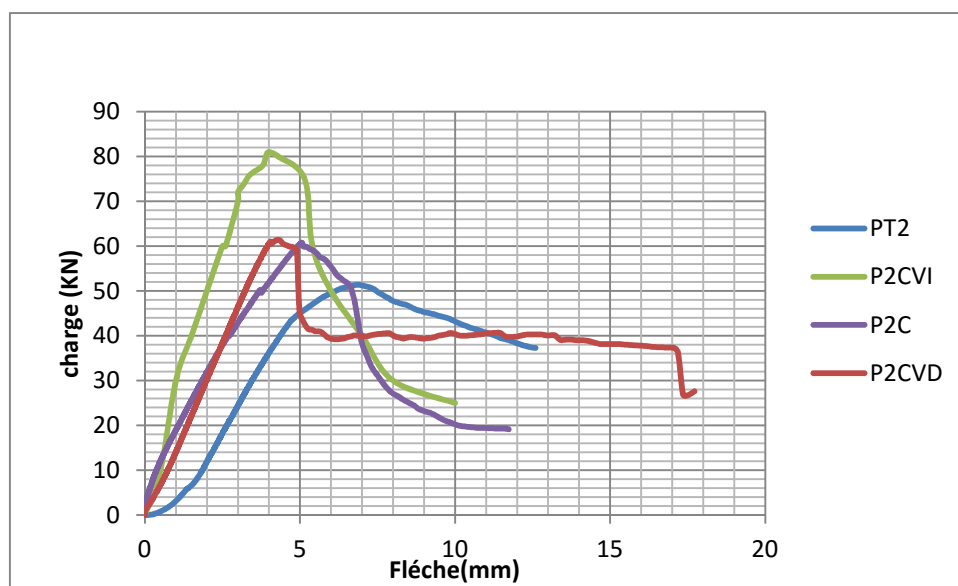


Figure II.39 : courbe de comparaison charge/flèche entre les 3 types de réparation (P2C, P2CVD, P2CVI) et la poutre témoin (PT2).

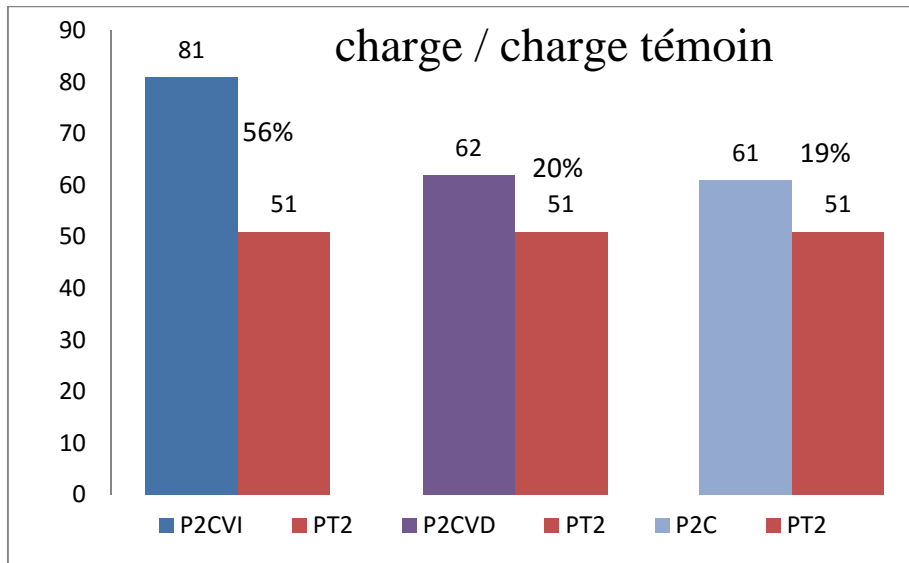


Figure II.40 : comparaison des forces ultimes des poutres réparées par rapport à la poutre témoin (Béton II)

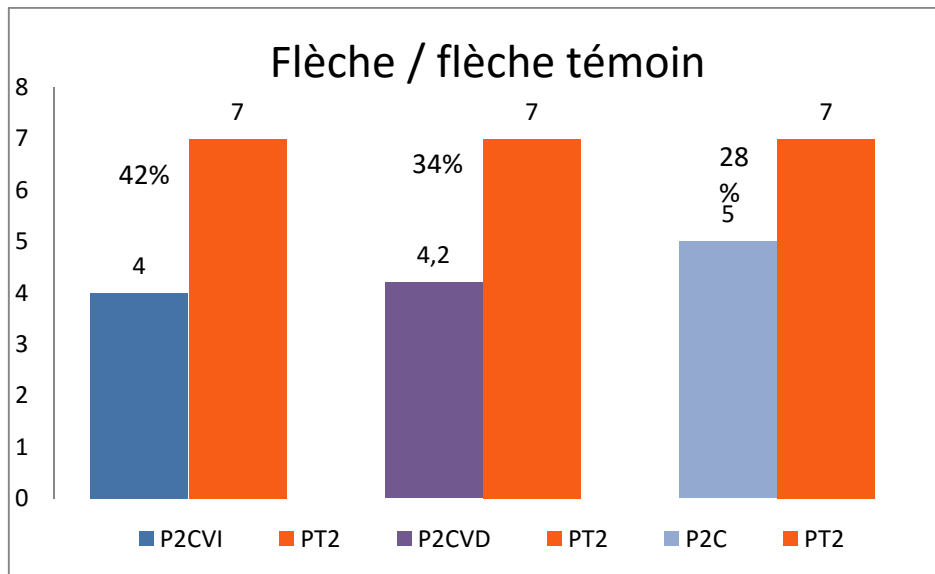


Figure II.41 : comparaison des flèches à la charge ultime de poutres réparées avec la flèche de poutre témoin béton II

II.8.5. Comparaison entre les résultats de réparation des deux bétons

Enfin on peut faire une comparaison globale entre les poutres des deux classe de résistance (béton I et béton II). Les résultats sont présentés dans le tableau II.20

Tableau II.20 : Résultats des poutres réparées

		Charge de rupture (KN)	Gaine par rapport témoin %	Flèche (mm)	Réduite par rapport au témoin %
Béton I	PT1	80	/	7	/
	P1C	88	10	7	0
	P1CVD	108	35	6.3	10
	P1CVI	119	48.75	5	28
Béton II	PT2	51	/	7	/
	P2C	61.2	20	5	28
	P2CVD	61.5	20	4.6	34
	P2CVI	81	56	4	42

Dans les deux classes de résistance, les poutres réparées à l'aide des FRP, présentent un comportement meilleur par rapport aux poutres de références, un gain de la charge de rupture et une diminution de la flèche sont observés. L'efficacité des PRF pour la réparation des poutres en béton armé est plus importante dans le cas où le béton présente une faible résistance par rapport à un béton de grande résistance.

Conclusion générale

Dans le cadre d'une étude visant la réparation des systèmes structuraux en béton armé, une investigation expérimentale a été conduite afin d'étudier le comportement des poutres en béton armé pré-fissuré, réparées par des matériaux composites (FRP) de tissu en fibres de verre et carbone. L'objectif principal visé à travers cette étude est l'obtention d'un modèle typique de renforcement des poutres pour augmenter la résistance de la poutre. A cet égard, un ensemble de vingt-quatre poutres en béton armé ont été testé 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 :

- Les ruptures des poutres de référence non réparées sont dues au moment fléchissant, et sont caractérisées par la plastification des armatures tendues et la rupture du béton comprimé au point d'application de la charge.

- Le tissu composite en face tendue ne contribue pas à la reprise de l'effort tranchant, tandis que les bandes de tissu ont joué le rôle d'étriers et ont aidé ceux existants (internes) à reprendre les sollicitations de cisaillement (effort tranchant)

- La réparation des poutres par des tissus en PRF a augmenté, dans tous les cas, leur résistance à la flexion comparativement à la poutre de référence, La réparation a retardé l'apparition des premières fissures sur les poutres au début du chargement.

- Les poutres pré-fissuré est réparées avec un renfort hybride (carbone, verre) présentent un gain dans la charge de rupture et une diminution de la flèche à la rupture très important ce qui prouve l'efficacité de ce type de renforcement

- La réparation des poutres par des bandes de fibre de verre sur les faces verticales permet d'augmenter la résistance à l'effort tranchant, cette augmentation est plus importante dans le cas où les bandes sont orientées à 45°

- l'efficacité de réparation des poutres par composite hybride

La réparation des poutres à l'aide PRF est plus efficace pour les bétons de résistance faible que pour les bétons de résistance élevée.

La rupture finale de poutres réparées est la même dans tous les cas. Elle est causée par les sollicitations de cisaillement et le décollement de tissu de réparation.

La réparation par collage de composites de fibres de carbone et de verre se caractérise par leur simplicité de mise en œuvre et leur efficacité, et le prix de revient réduite, et les matériaux utilisés par leur résistance à la traction élevée et leur bonne résistance à la corrosion.

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

- [1] **Amjad K2012** Prolongation de la durée de vie des ouvrages en béton armé), thèse doctorat L'INSA de Toulouse .
- [2] **Boudjakdji A et Laichaoui A 2003** « Renforcement des poutres en béton armé soumises à la flexion par matériaux composites », Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2003.
- [3] **Ahmed Laichaoui 2006** « Analyse expérimentale du comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composite » mémoire de magister l'Ecole Nationale Polytechnique 2006
- [4] **C.G.S,** « Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages », Alger – 2^{ème} Semestre 1992.
- [5] **NGO Minh Duc 2016** Renforcement au cisaillement des poutres en béton armé par matériaux composites naturels (fibre de lin) thèse de doctorat de l'université de Lyon 2016.
- [6] **ABDELHAK BOUSSELHAM 2005** « Comportement au cisaillement des poutres en béton armé renforcées en cisaillement à l'aide de matériaux composites avancés » thèse doctorat université QUÉBEC 2005.
- [7] **L. Michel, 2007** « Approches locales et globales du comportement de dalles en béton armé renforcées par matériaux composites ».thèse doctorat 2007.
- [8] **BOUSSAHA, Fateh 2008** « Comportement en fatigue de poutre en béton armé renforcées en cisaillement à l'aide de matériaux composites avancés »mémoire universités du QUEBEC.
- [9] **T. CHICOINE 1997,** « *Analyse et conception d'ancrages sur les poutres renforcées en flexion à l'aide de matériaux composites* », Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Université de Sherbrooke, 1997.
- [10] **Amjad Kreit 2015**« Prolongation de la durée de vie des ouvrages en béton armé »thèse doctorat universités de TOULOUSE 2015.

[11] **Philippe LAMOTHE 1999** « essais de renforcement avec des matériaux composites pour des poutres de pont en béton armé » thèse doctorat université de SHARBROOKE 1999.

[12] **Marie-Claude Guérin, 1998** « renforcement à l'effort tranchant de poutres en béton armé » Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'université Laval pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc)

[13] **M. ABDESSEMED 2003**, « *Comportement des poutres isostatiques en béton armé renforcées par tissu et lamelle de fibre de carbone* », Mémoire de magister, Université de Blida, 2003.

[14] **Mosallam A ,Hossein M, Tarek H 2015**(structural évaluation of reinforced concrete beams strengthened with innovative bolted/bonded advanced FRP composites sandwich panels composite structures 2015

[15] **N. Attari1 S, Amziane M et Chemrouk M** (Efficacité du renforcement des poutres en béton armé par des matériaux composites) Article in MATEC Web of Conferences · September 2012

[16] **Ze Yi Wu 2010**« Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton armé pré-fissurées et renforcées par matériaux composites sous chargement statique et de fatigue ».2010

[17] **A. Rizzo and L. De Lorenzis**, « Behavior and capacity of RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement, » *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 4, pp. 1555–1567, Apr. 2009.

[18] **Sihem Kermiche & Bachir Redjel 2012** « Analyse expérimentale et analytique du comportement en flexion des poutres en béton armé pré-fissurées renforcées par un matériau composite en toile de fibres de carbone » *Rev. Sci. Technol., Synthèse 25 : 41- 58 (2012)*

[19] **W. Li and C. K. Y. Leung 2015**, “Shear Span–Depth Ratio Effect on Behavior of RC Beam Shear Strengthened with Full-Wrapping FRP Strip,” *J. Compos. Constr.*, p., Oct. 2015.

[20] **M. BOUMAAZA S. et AL .2015** « Réhabilitation des Poutres en Béton Armé Rompues au Cisaillement à l'aide des Matériaux Composites » article (22ème Congrès Français de Mécanique Lyon).

[21] **Hicham BELHANNACHI 2009** « réhabilitation et renforcement des poteaux en béton armé » **Thèse** du Diplôme de Magister Université Mentouri, Constantine

- [22] **Tania CROSTON 2006** « étude expérimentale du comportement d'une poutre en béton armé en flexion 3 points réparée par matériaux composite » thèse doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux
- [23] **Jean LUYCKX 2009** « composites à fibre de carbone dans le génie civil » article **C5 440**.
- [24] **SIKA ELDJAZAIRE 2016** « réparation et renforcement des structures » article © SIKA EL DJAZAIR / REFURBISHMENT / Hôtel Azzemour - Bejaia / 09.2016
- [25] **SIKA ELDJAZAIRE** « fiche technique de **SikaWrap-230 C/45** » 2016
- [26] **SIKA ELDJAZAIRE** « fiche technique de **Sikadur®-330** » 2016
- [27] **FICHE TECHNIQUE DE CIMENT CHAMIL**
- [28] **FICHE TECHNIQUE DE CIMENT MATIN.**
- [29] **El Houssain ROCHDI**, « contribution à l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton arme renforcées par matériaux composites », thèse de l'université Claude Bernard - Lyon 1.
- [30] **Djeddi F 2016** « comportement en flexion des poutres en béton armé renforcées par des matériaux composites hybride » thèse doctorat université Tahri Mehammed Bécher.

Références Bibliographiques