
Etude du comportement mécanique de liaison BA Voile-dalle renforcé par PRFC sous chargement cyclique alterné

A. CHALOT¹, L.MICHEL^{1*}, E.FERRIER¹, N. ROY²

¹Université de Lyon, Université Claude Bernard LYON 1, Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction, LMC²

82 boulevard Niels BOHR, Site de Villeurbanne DOUA, 69622 VILLEURBANNE Cedex - FRANCE

² Université de Sherbrooke, Département génie civil, Sherbrooke, Canada

e-mail : antoine.chalot@univ-lyon1.fr ; *laurent.michel@univ-lyon1.fr ; emmanuel.ferrier@univ-lyon1.fr

RESUME. L'utilisation des polymères renforcés de fibre de carbone dans la réparation est une technique largement répandue. On retrouve dans la littérature de nombreuses études ayant démontrées l'intérêt des renforts par PRFC dans le renforcement de structure face aux sollicitations sismiques. Cette étude cherche à étudier l'impact d'un renfort sur le comportement d'une liaison voile/dalle en béton armé. L'étude s'articule autour d'une campagne expérimentale menée sur 4 spécimens renforcés. L'objectif est d'étudier le comportement et l'endommagement de divers spécimens face à un chargement cyclique alterné. Le comportement des différentes configurations de renfort est comparé à celui de l'essai témoin. Les résultats montrent un gain de résistance pouvant atteindre 70% et de raideur de l'ordre de 60%. Les configurations de renfort n'ont que peu d'impact sur la ductilité des liaisons. Les tests montrent également que les solutions de liaisons renforcées ne dissipent pas plus d'énergie que le témoin.

ABSTRACT. The use of carbon fiber-reinforced polymers in repair is a widely used technique. Several studies available in the literature demonstrate that carbon fibers can be employed in Externally Bonded (EB) Fiber-Reinforced Polymer (FRP) strips for strengthening existing Reinforced Concrete (RC) members. The study aims at demonstrating the feasibility of retrofitting RC wall/slab connection by using Fiber Reinforced Polymers with Carbon Fibers (CFRP). This study consists of an experimental campaign conducts on four specimens. The objective is to study the behavior and the damage evolution process during the cyclic loading. The behaviour of the different reinforcement configurations is compared to that of the control test. The results show a strength increase of 70% and a ductility increase of 60%. The reinforcement also increases the stiffness of the specimens. The tests also show that the reinforced connections do not dissipate more energy than the control one.

MOTS-CLES : renforcement, réparation, campagne expérimentale, parasismique, PRFC

KEY WORDS : strengthening and repair, experimental study, seismic applications, CFRP

Introduction

La nécessité de protéger les biens et les personnes contre le risque sismique est devenue une préoccupation importante des législateurs. Afin de réduire le risque, les réglementations deviennent de plus en plus sévères. Une part importante du parc immobilier et des infrastructures de transport construites au cours des années 70 / 80 ne répondent plus aux dernières exigences réglementaires. Il est donc nécessaire de développer des solutions de renforcement afin d'assurer la tenue des structures face aux sollicitations sismiques. Les séismes entraînent un déplacement du sol. L'accélération du bâtiment entraîne une flexion des éléments verticaux et horizontaux ainsi qu'une augmentation des efforts dans les liaisons. L'apparition de rotules plastiques au sein d'une liaison peut entraîner une instabilité pouvant mener à une ruine totale de l'ouvrage. Pour répondre aux exigences des nouvelles normes et assurer la stabilité des ouvrages il est nécessaire d'apporter des solutions de réparation et renforcement pour les structures existantes. Le renforcement et la réparation des structures à l'aide de matériaux composites stratifiés au contact (FRP) et plus particulièrement ceux à matrice époxy et fibres de carbone (CFRP) ont montré un grand potentiel, et ce depuis de nombreuses années. Les CFRP possèdent de très bonnes propriétés mécaniques avec des résistances qui peuvent atteindre 2000 MPa et un module de l'ordre de 230 GPa. Ils peuvent assurer le rôle d'armatures complémentaires dans un élément en flexion, le rôle de renforts transversaux dans le cadre de la résistance à l'effort tranchant ou assurer le confinement d'un élément comprimé. Les bonnes performances mécaniques des CFRP conduisent généralement à une rupture dans le support béton plus faible mécaniquement sans atteindre des taux de travail dans les renforts composites importants.

Afin de permettre une optimisation, une des solutions peut être d'améliorer les conditions de liaison entre les renforts composites et le support béton par des ancrages. Cette problématique est également présente dans les liaisons. Le comportement des liaisons renforcées est peu traité dans la littérature par rapport aux travaux se focalisant sur le comportement d'éléments renforcés isolés : poutres, dalles, poteaux, voiles (1), notamment dans le cas de liaison entre des voiles et des planchers. Par conséquent, l'objectif de cette campagne d'essai est d'étudier le comportement de liaison dalle/voile face à un chargement cyclique alterné. Le chargement cyclique permet de simuler les sollicitations et le comportement d'un élément soumis à une sollicitation sismique. L'étude se porte en particulier sur différentes configurations d'ancrages.

1 Présentation des essais

1.1 Matériaux

Le béton mis en œuvre est un C30/37. Lors de chaque coulage, 5 éprouvettes cylindriques 16/32 sont coulées afin de mener des essais de convenance en compression et en fendage. La résistance moyenne en compression du béton est de $f_{cm}=37.7$ MPa avec un écart type de ± 1.7 MPa. La résistance en traction par fendage du béton est égale à $f_{ct} = 5.9$ MPa avec un écart type de ± 0.5 MPa.

Les aciers longitudinaux de nuance S500B mis en œuvre sont testés en traction. Leur limite élastique est de $f_y=545$ MPa avec un écart type de ± 6 MPa, leur limite ultime est de $f_u= 596$ MPa avec un écart type de ± 4 MPa et un module de $E_s = 198$ GPa.

Le renfort utilisé est un tissu à base de fibres de carbone mis en place par stratification au contact, dénommé **Foreva® TFC** commercialisé par l'entreprise FREYSSINET (2). Il se compose d'un textile bidirectionnel Carbone/Carbone avec un taux de 70/30, la matrice est une colle bi-composante de type époxy. Les propriétés du renfort sont résumées dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** L'épaisseur moyenne du renfort est égale à 0,48mm. Sa résistance en traction est de $f_r=1700$ MPa et son module d'élasticité est égale à $E_r = 105$ GPa.

Les mèches d'ancrage mises en œuvre sont également commercialisées par FREYSSINET, il s'agit de mèches d'ancrage de type Foreva® WFC 100. Ces mèches sont constituées d'un assemblage de fils de carbone (comprenant chacun 12 000 fibres). Les mèches d'ancrage en fin de bande (AL) sont composées de **36 fils**, pour une résistance en traction de **42 kN**. Les mèches anti-flambement (AT) sont faites de **10 fils**, pour une résistance en traction de **10 kN**.

1.2 Corps d'épreuve

Cette étude est menée sur des liaisons voile/dalle en T. Dans une structure réelle cela correspond à une liaison de rive. Les spécimens sont composés d'un élément voile d'une épaisseur de 16 cm, de longueur 100 cm et de largeur 50 cm. L'élément dalle mesure 9 cm d'épaisseur pour une portée de 100 cm est encastrée dans le voile à mi-hauteur. Le ferrailage est continu mais le bétonnage s'effectue en deux temps. La première phase consiste à coffrer et à couler le voile à plat, la seconde consiste à réaliser l'élément dalle. 4 tiges filetées sont scellées dans le béton frais à l'extrémité de la dalle permettant par la suite à fixer la platine du vérin de chargement.

Le ferrailage longitudinal de la dalle se compose de 3 cadres en HA10 sur chaque face soit un $\rho_s=0.3\%$, et de 8 cadres en HA10 dans la direction transversale : $\rho_s = 0.4\%$. Dans la dalle un lit de 9 HA6 sur chaque face ($\rho_s = 0.5\%$) et 7 cadres en HA6 dans la direction transversale : $\rho_s = 0.2\%$ sont mis en place.

Les dimensionnements des éléments béton armé sont réalisés afin de garantir une rupture des corps d'épreuve au niveau de la liaison voile-dalle (3). Au total 4 spécimens sont menés à rupture, un spécimen témoin (RC-REF) et 3 spécimens renforcés par matériaux composites suivant 3 configurations différentes (**Figure 1**). La quantité de renfort a été calculée conformément à aux recommandations de l'Association Française de Génie Civil sur le renforcement des structures par FRP. Le spécimen RC-FRP (**Figure 1 a**) 3 bandes de 60 mm de large pour 60 cm de long sont collées sur chaque face de la dalle avec un espacement entre bande de 40 mm. Le spécimen RC-FRP-ALi-At (**Figure 1 b**) reprend la disposition des bandes composites du spécimen RC-FRP et ajoute des mèches d'ancrage à la liaison voile-dalle et des mèches anti-flambement. Pour chaque bande composite 1 mèche d'ancrage au niveau de la liaison et 5 mèches anti-flambement ont été ajoutées. Les géométries des différentes mèches d'ancrage sont définies conformément aux recommandations de l'avis technique du fournisseur FREYSSINET (2). Une partie de 150mm est introduite dans la réservation de diamètre 20mm réalisée à la jonction voile-dalle avec un angle de 20°. La longueur de 150mm restante de la mèche est épanouie sur la bande composite déjà mise en place sur le support. Elles sont composées d'un assemblage de 36 fils de carbone.

Les micros mèches transversales assurent la liaison entre les deux faces du renfort et réduisent le risque de flambement des bandes. Le Spécimen RC-FRP-ALc-At (**Figure 1 c**) est similaire à RC-FRP-ALi-At à la différence que les mèches d'ancrage sont continues au droit du nœud. L'ensemble des renforts et des ancrages sont symétriques sur les deux faces.

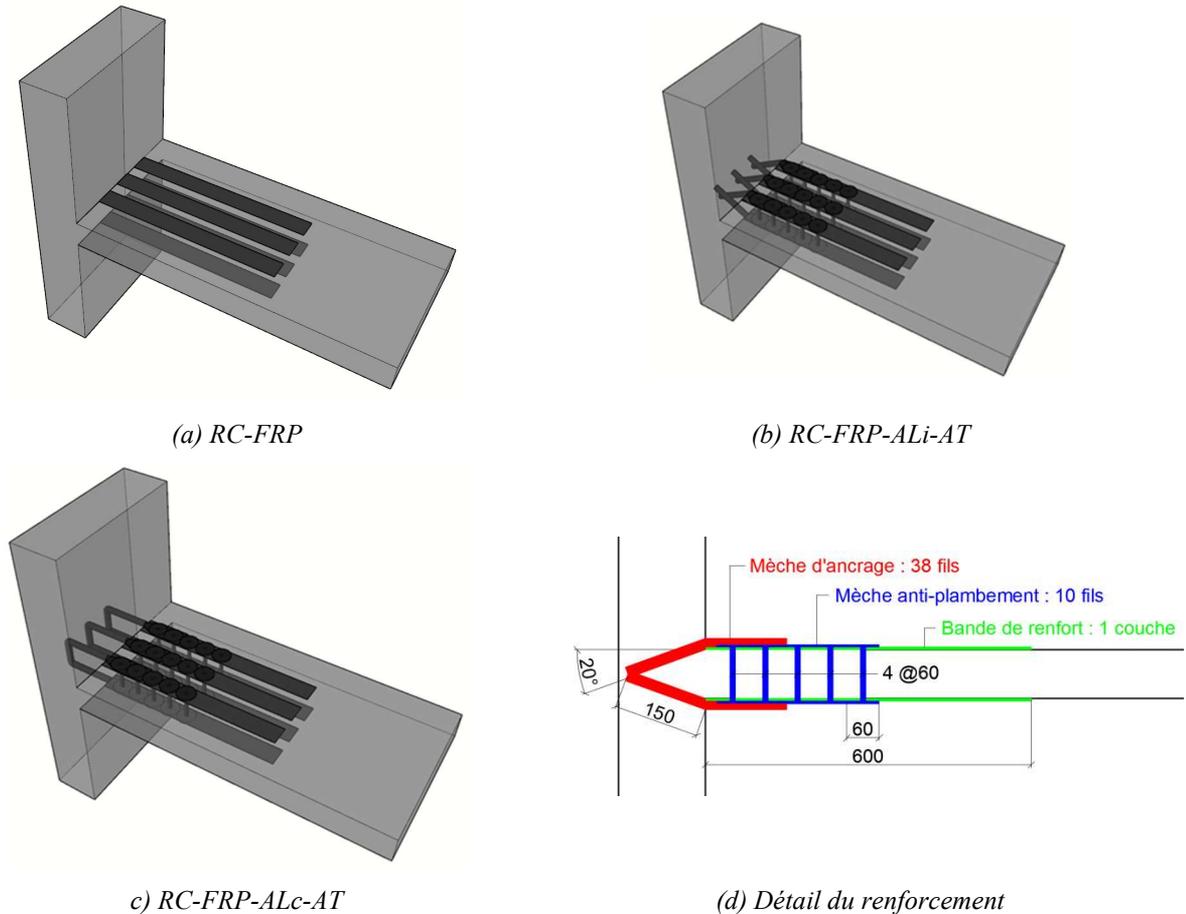


Figure 1. Schéma des configurations de renfort

Dans un premier temps la surface de béton est poncée et les réservations sont percées, $\phi 20\text{mm}$ pour les mèches longitudinales et $\phi 8\text{mm}$ pour les mèches transversales. Le support et les bandes sont imprégnés de résine (**Figure 2 a**). Les bandes sont ensuite mises en place et marouflées (**Figure 2 b**). Les mèches transversales sont mises en place puis épanouies sur toute la largeur des bandes (**Figure 2 c**). La résine de scellement est injectée avant l'introduction des mèches longitudinales (**Figure 2 d**). Le renforcement des spécimens a été fait suivant les recommandations fournisseur (2).



(a) Préparation support

(b) Bande CFRP

(c) Mèches transversales

(d) Mèche longitudinale

Figure 2. Photos de la mise en œuvre (CFRP, AT, AL)

1.3 Chargement et condition d'appuis

La partie voile du spécimen est placée parallèlement à la dalle d'essai. Le chargement est appliqué en tête de voile. Le chargement est appliqué par l'intermédiaire d'un vérin hydraulique d'une capacité de ± 500 kN et d'une amplitude ± 50 mm. Le vérin est bi-rotulé ce qui supprime les efforts parasites. La dalle est donc dans une configuration encastrée libre. Les mouvements horizontaux du voile sont bloqués par des équerres métalliques placées à chaque extrémité. Les déplacements verticaux sont bloqués par des profilés métalliques rigides placés à 200mm de part et d'autre de la dalle boulonnée à la dalle d'essai. Le chargement est de type cyclique alterné. Pour chaque pas de déplacement 3 cycles sont effectués. La vitesse de chargement est de 30 mm/min de 0 à 20mm et de 60 mm/min au-delà.

2 Présentation et analyses des résultats

2.1 Courbe charge-déplacement

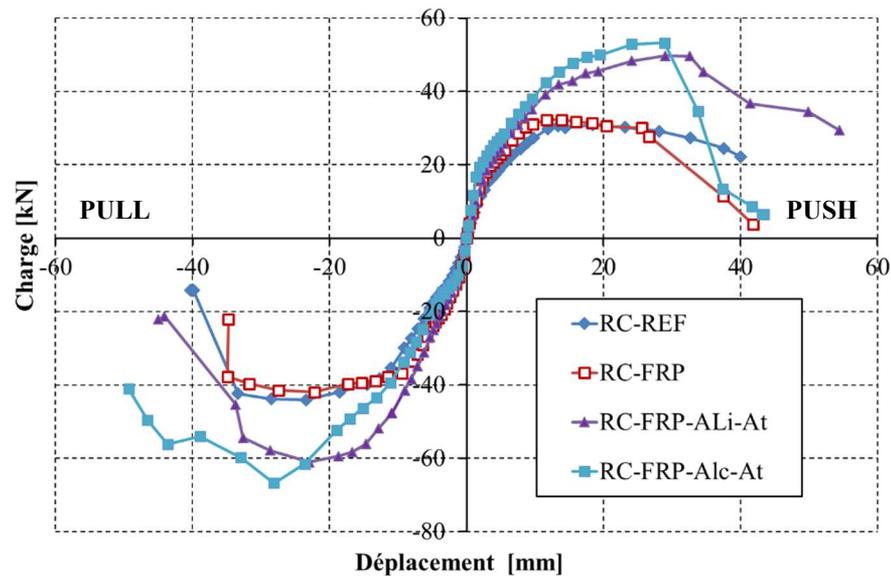


Figure 3. Courbe charge-déplacement

Name	F_u^- [kN]	[%]	δ_u^- [mm]	[%]	F_u^+ [kN]	[%]	δ_u^+ [mm]	[%]
RC-REF	44.05	-	23.43	-	30.85	-	18.45	-
RC-FRP-ALi	41.95	-5	22.22	-5	32.25	+5	13.91	-25
RC-FRP-ALi-At	61.05	+39	22.97	-2	49.70	+61	29.02	+57
RC-FRP-ALc-At	66.80	+52	28.11	+20	53.25	+73	28.92	+57

X_u^- : maximal value in pull, X_u^+ : maximal value in push

Tableau 1. Charge maximale et déplacement associé mesurés pendant les essais

En comparant les résultats de RC-REF et de RC-FRP, on observe que lorsque le renfort n'est pas ancré au niveau du nœud il n'y a aucun gain de résistance. Le fait d'ancrer le renfort par des mèches (RC-FRP-ALi-AT) apporte un gain de résistance de 39% en pull et de 61% en push. En modifiant la forme des mèches d'ancrage (RC-FRP-ALc-AT) le gain de résistance passe à 52% en pull et à 73% en push soit une augmentation de 10%. Sur la Figure 3 on retrouve la courbe enveloppe de charge-déplacement des 4 essais. Le Tableau 1 présente les des charges maximales obtenues dans les deux directions.

2.2 Energie

Ce paragraphe permet d'étudier l'impact du renforcement sur le comportement énergétique de la liaison. L'énergie dissipée (DE) correspond à l'aire sous la courbe d'hystérésis de chaque cycle. L'énergie élastique (EE) correspond à la force maximale mesurée multipliée par la déformation mesurée à un instant, le tout divisé par 2. On s'intéresse ici à l'évolution des énergies cumulées, soit la somme de l'ensemble de l'énergie élastique et de l'énergie dissipée mesurée à chaque cycle.

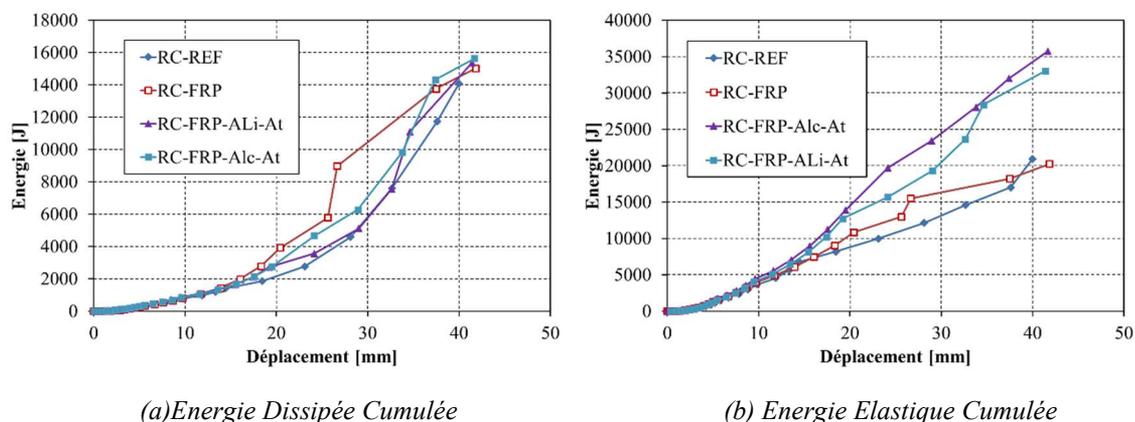


Figure 4. Evolution de l'énergie dans les liaisons

Les résultats de la campagne d'essai montrent que la quantité d'énergie dissipée ne varie presque pas en fonction des configurations. Le renforcement des liaisons ne semble pas avoir d'impact sur ces paramètres. La quantité d'énergie élastique totale est quant à elle bien plus importante pour les spécimens renforcés avec ancrages que pour les configurations non ancrées (RC-REF et RC-FRP). On note un gain de près de 100%.

Conclusion

Cette campagne expérimentale a étudié le comportement de liaisons dalle/voile en BA renforcées par PRFC face à une sollicitation cyclique. Cette étude montre que l'on peut renforcer des liaisons BA dans les mêmes proportions que d'autres éléments en BA et ce en utilisant unique des renforts en carbone. Les points clés de cette étude sont les suivants :

- Le renfort sans ancrage dans le nœud ne permet pas d'augmenter la résistance et n'impacte pas le comportement de liaison ;
- L'ajout de mèches en carbone inclinées (RC-PRF-ALi-At) permet d'accroître la résistance de 50%, les mèches continues (RC-PRF-ALc-At) permettent d'augmenter le gain à 60%.
- Le renforcement de la liaison augmente la raideur de RC-PRF-ALi-At et RC-FRP-ALc-At pendant les trois phases d'endommagements (Elastique, progression des fissures, plastification des aciers).
- Contrairement au renforcement d'autre élément en RC à l'aide de PRF nous n'avons pas observé une augmentation de l'énergie dissipée sur les spécimens renforcés.

Remerciement

Les auteurs remercient le projet ANR « ILISBAR » pour le financement de l'étude. Les auteurs remercient également l'équipe de techniciens (E. Janin et N. Cottet) pour leur support technique.

Bibliographie

1. S., QAZI. *Comportement mécanique sous sollicitations alternées de voiles béton armé renforcés par matériaux composites*, Ph D. Thesis, INSA Lyon. 2013.
2. FREYSINET. *Avis Technique Foreva TFC / TFC H - Foreva WFC 100 - Avis Technique 3/14-757*V2*. 2017.
3. COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION, BRUSSELS (BE). *Eurocode 2 : Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings EN 1992-1-1*. 2004.
4. AFGC. *Recommandations provisoires : Renforcement parasismique de structures en béton armé par matériaux composites*. 2015.
5. PAMPANIN, AKGUZEL and s. *Recent development in seismic strengthening of RC Beam-Column Joints with FRP Materials*. 2012.
6. EL-ENEIN, HOSSEIN EZIMI, KHALED SENNAH and FAOUZI GHRIB. *Flexural strengthening of reinforced concrete slab-column connection using CFRP sheets*. 2014.
7. FAWZY, m. KASSEM and TAREK m. *Strengthening of defected beam-column joints using CFRP*. 2012.
8. TRAN, B MATUSZKIEWICZ and MUHAMMAD N. S HADI. *Response of substandard reinforcing details T connections upgraded with concrete covers and CFRP*. 2012.