
Evaluation de la performance des TRC et des solutions hybrides dans le cadre de la réparation et le renforcement de poutres en béton armé

Si Larbi A.^{1*}, Contamine R.¹, Hamelin P.¹

¹ Université de Lyon, Université Lyon 1, INSA-Lyon, LGCIE, 82 boulevard Niels Bohr, F-69622 Villeurbanne cedex, France,

* amir.si-larbi@univ-lyon1.fr

RESUME. Le présent travail, à caractère exploratoire, vise à mettre en évidence l'intérêt de solutions alternatives au carbone-époxy dans le cadre de la réparation de structures en béton armé vis-à-vis de la flexion par l'emploi de matériaux composites de type textile mortier (TRC). Il a permis de mettre en avant les bonnes dispositions des solutions hybrides que ce soit en termes de comportement ultime ou de comportement en service avec des niveaux de performances très comparables aux solutions traditionnelles telles que le CFRP. Il est bon de souligner aussi la modification, dans un sens favorable, du mode de rupture dans le cas de solutions TRC ou associant le TRC et des joncs de carbone et/ou verre.

ABSTRACT. The experimental part of this article has brought out the positive factors of TRC hybrid solutions in the repair of reinforced concrete beams, in terms of both ultimate and service behavior, with very similar performances to that of traditional solutions such as CFRP. The use of TRC alone to strengthen a reinforced concrete beam seems less advantageous and while it significantly improves the ultimate performance, it cannot be considered in the context of increasing the bearing capacity. It does, nevertheless, appear interesting for the control of cracking in the service phase. It is important to outline the change of failure mode in the TRC and TRC with glass and/or carbon rods solutions; this allows a better use of the reinforcement and that can be explained by the relatively low axial stiffness of reinforcement.

Mots-Clés : Composite textile mortier – Réparation et renforcement – flexion.

Keywords: Textile Reinforced concrete – Retrofitting – bending moment.

1. Introduction

Bien qu'incomplète et parfois incertaine la connaissance des TRC (Textile Reinforced Concrete) a sensiblement progressé ces dernières années, les principales études s'y rapportant se focalisant particulièrement sur sa caractérisation mécanique et l'identification des mécanismes d'interaction et de transfert d'effort entre l'armure textile et la matrice (Cuyppers et Al., 2005, Hegger and al., 2008, Peled et al., 2005). S'il est désormais établi que l'un des verrous scientifiques tient à la difficulté de quantifier précisément l'interaction (plutôt faible) textile-mortier, laquelle est étroitement conditionnée par les modalités de mise en œuvre, il n'en demeure pas moins que les TRC peuvent constituer une solution potentiellement intéressante si seules des considérations de contrôle de fissuration guident le renforcement de poutres. Aussi, dans la perspective de performances ultimes améliorées le recours à des joncs de renfort semble indispensable compte tenu des faibles résistances ultimes des TRC comparativement au CFRP si l'on s'en tient à des épaisseurs aussi réalistes que valorisables, soit inférieures à 15 mm.

Rares sont les études qui se sont penchées sur les aptitudes des TRC dans le cadre d'applications structurales (Si Larbi *et al.*, 2010, Triantafillou *et al.*, 2006) et plus précisément vis-à-vis du moment fléchissant (Brückner *et al.*, 2006).

Le présent travail s'appuie sur 5 poutres de longueur 2 m et vise à étudier la faisabilité technologique et les performances mécaniques d'une solution à base de TRC. Qu'il s'agisse de performances ultimes (capacité portante, ductilité...etc.) ou de performances à l'état de service (fissuration, flèche) qui seront positionnées par rapport à celle d'une solution TRC. A cet effet, deux variantes, associées à des modalités de mise en œuvre distinctes et à des visées différentes, seront considérées. La première portant sur l'étude du renforcement de 2 poutres saines correspondant à une mise en œuvre de TRC à même la poutre ayant pour objectif principal le contrôle de la fissuration. La seconde relative à 3 poutres préalablement endommagées jusqu'à l'initiation de la plastification des aciers puis réparées (dont une avec du CFRP) au moyen de plaques de TRC + joncs (carbone et/ou verre) et collées sur le subjectile au moyen d'une résine structurale sur la face tendue avec pour objectif prioritaire l'accroissement significatif des performances ultimes.

2. Approche expérimentale

Précisons d'emblée que les renforts adoptés dans le cas des poutres endommagées ont été dimensionnés en première approche sur la base des recommandations AFGC (Recommandations françaises, 2010), relatives à la réparation et renforcement des structures en béton armé au moyen des matériaux composites, de sorte à obtenir *a priori* des capacités ultimes équivalentes.

2.1. Propriétés des matériaux

TRC : Le TRC retenu est constitué d'un mortier à granulométrie fine (diamètre du plus gros granulat inférieur à 0,8 mm) et d'un renfort textile. Le renfort est une grille textile tricotée à maille jetée (warp knitting). Les mailles sont rectangulaires et

aérées afin de faciliter la pénétration du mortier à travers les fils et assurer ainsi une bonne adhérence fils/mortier. Le fil trame (direction de sollicitation) est en verre AR (résistance et durabilité visées) alors que le fil chaîne est en polyester. Le mode opératoire retenu est le moulage au contact.

Enfin signalons que 2 variantes ont été retenues la première (TRC) est constituée de 3 renforts noyés dans le mortier alors que la seconde est constituée de 2 couches de renfort associées soit à des joncs de carbone (TRC + JC) soit à une combinaison de joncs de carbone et de verre (TRC + JVC). La surface des joncs a été l'objet d'un traitement de surface adapté (surface parsemée de silice) destiné à améliorer sa rugosité. L'essai de traction est illustré par la figure 1.

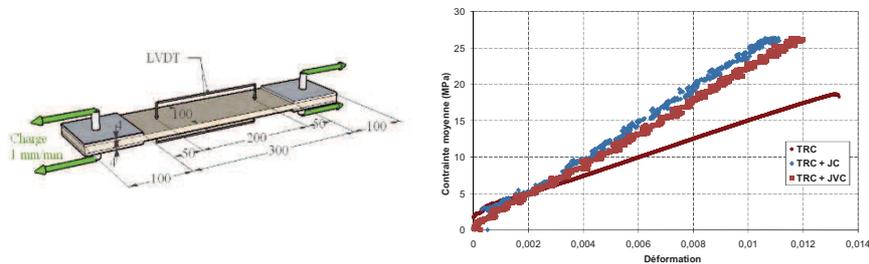


Figure 1. Essai de traction retenu et loi de comportement des renforts testés

On remarquera que contrairement à ce qui est généralement observé dans la littérature (Hegger and al., 2008, Peled et al., 2005) le TRC confectionné dans le cadre de cette étude présente un comportement quasiment élastique linéaire du fait de la l'ajout d'une résine d'imprégnation qui permet d'homogénéiser la contribution des filaments, et partant, d'adoucir très nettement la zone de multifissuration. S'agissant des renforts hybrides, leur comportement linéaire est clairement conditionné par ceux des joncs dont ils sont pourvus dans la mesure où l'augmentation très sensible de la rigidité globale est principalement le fruit de la bonne interaction (essentiellement par adhérence frictionnelle) entre le mortier et les joncs.

Composite carbone époxy (CFRP) : Les principales propriétés du CFRP (composite fiber reinforced polymer) sont une épaisseur de 0.4 mm, une contrainte de traction à la rupture de 700 MPa associées à un module de d'Young de 80000 MPa.

Béton et acier : les poutres sont renforcées en traction par deux barres HA12 (la poutre est prémunie vis-à-vis de l'effort tranchant par un ferrailage dense, soit 22 cadres HA6). L'acier employé est de nuance S500. Afin de limiter la dispersion des résultats l'ensemble des poutres est issue de la même gâchée. La résistance en compression du béton à 28 jours établie, conformément à la norme NF P 18-406, sur la base de 6 corps d'épreuve est de 30,5MPa.

2.2. Configurations d'essai et instrumentation

Cinq poutres en béton armé ont été confectionnées et testées. La longueur des poutres est de 2,3 m dont la distance entre appuis est de 2m. La section est rectangulaire de dimensions 0.15*0.25 m.

Le tableau 1 illustre les configurations adoptées soit 3 poutres (TRC, TRC+JC, TRC+JVC) préalablement endommagées jusqu'à la plastification des armatures tendues, et deux poutres (poutre de référence ainsi que celle renforcée par TRC) qui n'ont pas subi d'endommagement.

L'essai retenu est une flexion quatre points monotone statique jusqu'à la rupture. L'instrumentation adoptée vise à évaluer la flèche à mi-travée (capteur LVDT ± 100 mm) et à mesurer sur la section centrale les déformations dans les armatures tendues (une jauge de 10 mm dans chacune des barres) et le béton comprimé (2 jauges de 70 mm sur la hauteur)

	Renforcement	Rigidité axiale E.A (MN)	Niveau d'endommagement	Dimensions de la section des renforts
Poutre 1 (Référence)	-	-	Poutres saines	-
Poutre 2 (TRC)	TRC (3 couches)	1,8		10 x 150 (mm)
Poutre 3 (CFRP)	CFRP	4,8	Poutres préalablement endommagées	0,4 x 150 (mm)
Poutre 4 (TRC + JC)	TRC (2 couches) + JC Joncs carbone	3,5		10 x 150 (mm) + 8 ϕ 2 (carbone)
Poutre 5 (TRC + JCV)	TRC (2 couches) + (JVC) joncs carbone et verre	3,3		10 x 150 (mm) + 4 ϕ 2 (carbone) + 12 ϕ 2 (verre)

Tableau 1. Identification des configurations de renforcement

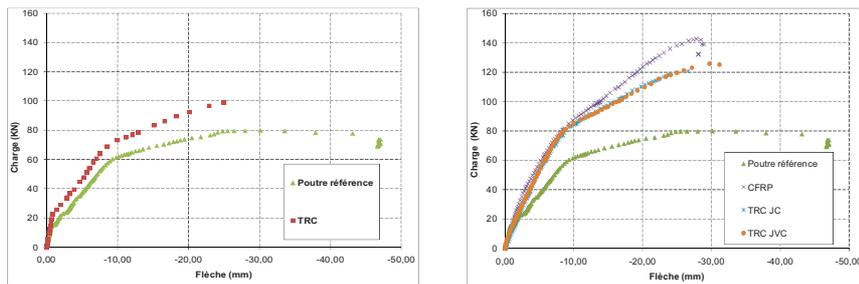
3. Résultats

3.1. Comportement global

3.1.1. Charge-flèche

Les courbes charge-flèche (figure 2) permettent de mettre en évidence le comportement différencié entre les poutres initialement saines et celles préalablement endommagées et réparées.

Dans le cas de poutres saines on peut identifier trois phases. La première traduit l'intégrité de la poutre dans la mesure où aucun des matériaux constitutifs de la poutre n'est endommagé. La deuxième correspond à l'initiation, la propagation des fissures et leur multiplication le long de la poutre, alors que la dernière phase apparaît lors de la plastification des armatures d'acier. On remarquera que l'endommagement préalable des poutres fait disparaître la phase 1. Nous pouvons aussi noter les gains, en termes de charge ultime et de service, obtenus au moyen du renfort TRC comparativement à la poutre de référence. Les solutions hybrides à base de TRC associé au carbone et/ou verre se positionnent favorablement par rapport à la solution CFRP bien que le niveau de charge ultime soit inférieur (12%).



(a) Poutres initialement saines

(b) Poutres initialement endommagées

Figure 2. Courbes charge-flèche

3.1.2. Modes de rupture

Un seul mode de rupture de type peeling-off est observé. Néanmoins, il est loisible de distinguer deux variantes. La première, caractéristique des ruptures de poutres renforcées par CFRP, porte sur les poutres TRC + JC et CFRP et se localise à l'extrémité de la poutre. Alors que la seconde se produit au centre de la poutre et s'accompagne de la rupture du composite de renforcement (TRC + JVC). Un des éléments d'explication de ce constat pourrait être la faiblesse relative de la rigidité axiale du renfort qui autoriserait une plus grande souplesse ce qui se traduirait par un état de contrainte comparativement adouci aux extrémités. Il en découlerait que la valeur limite de la rigidité axiale dissociant les deux champs de rupture (peeling-off à l'extrémité ou en partie centrale) serait donc encadrée par celles des rigidités

axiales du TRC + JC et TRC + JVC ce qui expliquerait leurs modes de rupture différenciés. Il n'est pas anodin de faire remarquer que ce type de rupture est très peu courant dans le cas du renforcement par carbone-époxy et se révèle plus avantageux dans la mesure où il permet d'envisager une meilleure optimisation du taux de travail du renfort par opposition à celui, assez faible, du CFRP. Aussi, signalons que ce type de rupture est indépendant du mode de mise en œuvre retenu (collage de plats au moyen d'une résine structurale ou alors mise en œuvre à même la poutre sans recours à une résine d'apport) et permet d'envisager de faire abstraction d'une résine d'apport sous réserve d'une consistance thixotropique adaptée à une mise œuvre aisée sur chantier.

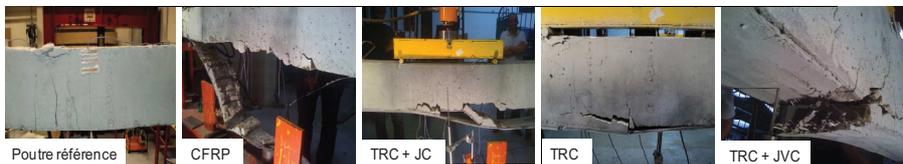


Figure 3. Modes de rupture des poutres testées

3.1.3. Rigidité flexionnelle

La rigidité flexionnelle peut être expérimentalement déterminée (EI_{exp}) à partir de la quantification du moment fléchissant agissant et de la courbure correspondante en s'appuyant sur les équations suivantes:

Pour la poutre de référence:

$$E \cdot I_{exp} = \frac{M}{\phi} \quad \text{avec} \quad M = \frac{F}{2} \cdot a \quad \text{et} \quad \phi = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{d} \quad (1)$$

Avec M: moment fléchissant (Nm) ϕ : courbure (m-1) F: Effort total appliqué (N), a = Distance entre l'appui et la charge la plus proche (flexion circulaire) (m); ϵ_c : Déformation dans la fibre de béton la plus comprimée; ϵ_s : déformation dans l'armature tendue; d: hauteur utile de la section de poutre.

Les courbes de la figure 4 mettent clairement en évidence les phases évoquées plus haut lors de l'analyse du comportement charge-flèche. Aussi, peut-on constater dans le cas de poutres préalablement endommagées la réduction plus-ou moins progressive de la rigidité flexionnelle sans palier initial. Les plaques de renfort (épaisseur 1cm) ne permettent pas, en dépit d'une rigidité flexionnelle propre non négligeable, de restituer, ne serait-ce que partiellement, une rigidité initiale supérieure à celle de la poutre endommagée. Pour autant nous pouvons remarquer

que la baisse de la rigidité flexionnelle est plus prononcée dans le cas du CFRP que dans celles de solutions hybrides (TRC + JC et TRC + JVC). Dans la mesure où le module de rigidité peut être considéré comme identique (même gâchée), seule l'inertie contrôlerait la rigidité flexionnelle (l'évolution de l'ouverture d'une fissure existante n'ayant aucune incidence sur la rigidité de la poutre). C'est donc bien la propagation verticale de la fissure qui explique cette baisse. Et il apparaît clairement que le renfort hybride est plus à même d'atténuer ou de freiner cette propagation.

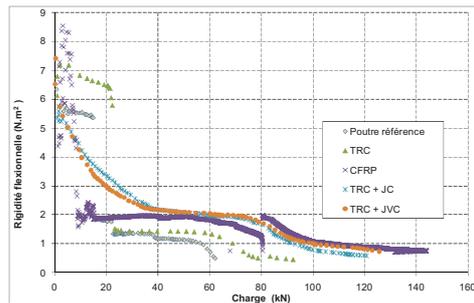


Figure 4. Evolution de la rigidité flexionnelle

Pour corroborer cette affirmation nous pouvons nous appuyer sur un indicateur indirect à savoir l'évolution de l'axe neutre sur la hauteur de la section (figure 4) qui met en lumière le caractère progressif de son évolution dans le cas de solutions hybrides et ce jusqu'à 40 kN. Au-delà les comportements des poutres endommagées sont qualitativement et quantitativement très proches soit une stabilisation de la position de l'axe neutre jusqu'à la plastification des armatures d'acier qui s'accompagne d'un léger relèvement de l'axe neutre. In fine, les positions des axes neutres des trois poutres endommagées sont très voisines. S'agissant de la poutre renforcée par TRC logiquement la première phase se traduit par une position très basse de l'axe neutre jusqu'à l'apparition de la première fissure aux alentours de 20 kN qui se traduit par un rehaussement de la position de l'axe neutre au-delà de celle de la poutre de référence du fait de la présence du TRC. La dernière phase accompagnant la plastification de l'acier se produit de manière différée (60 kN) et de façon plus marquée que dans le cas des poutres endommagées probablement du fait de la capacité de redistribution dans le TRC rendue difficile par l'ajout d'une résine d'imprégnation.

Notons enfin, qu'au voisinage de la rupture la rigidité flexionnelle des quatre poutres réparées ou renforcées est très proche de celle de la poutre de référence traduisant ainsi l'insopérance du renfort à l'approche de l'état limite ultime.

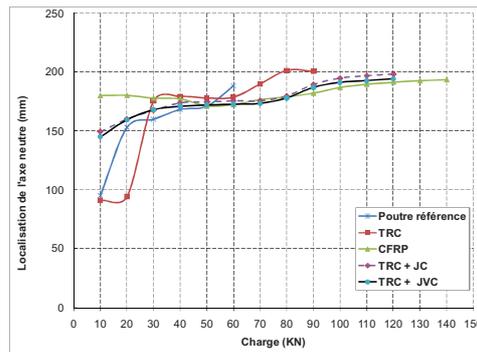


Figure 5. Evolution de la position de l'axe neutre

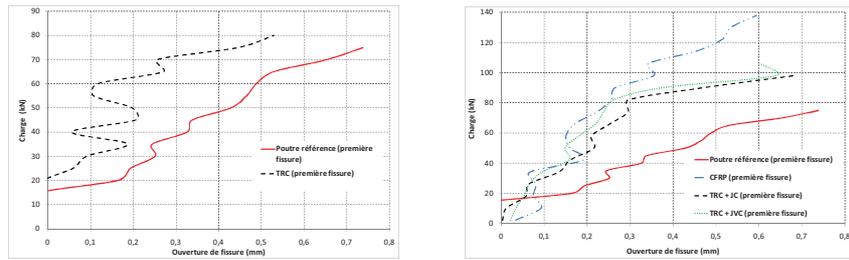
3.1. Comportement local

3.1.1. Ouverture de fissure

La figure 6 permet d'apprécier l'évolution de la première fissure apparue pour chacune des poutres testées. On peut d'emblée identifier une correspondance entre le comportement global (charge-flèche et Rigidité flexionnelle-charge) et l'évolution de l'ouverture de fissure pour les deux variantes traitées. Dans le cas des poutres endommagées deux phases sont observées : la première (0 à 80 kN) correspondant à une ouverture de fissure progressive dès le début du chargement complétée par une seconde (80 kN jusqu'à rupture) correspondant à une pente sensiblement plus faible associée à la plastification de l'armature d'acier. On constate une réduction très sensible de l'ouverture de fissure par rapport à la poutre de référence (dès que celle-ci s'endommage).

S'agissant de la poutre renforcée par TRC au-delà de la phase supplémentaire initiale (0 à 22kN) exempte de fissures, on retiendra l'évolution en dents de scie bien plus marquée et qui s'explique par des conditions de redistribution d'efforts moins favorables que dans le cas de renforts hybrides. En effet, l'absence de joncs susceptibles de reprendre à proximité l'effort supplémentaire généré par l'apparition d'une fissure couplée à l'éloignement relatif du TRC des armatures d'aciers allonge le parcours de l'effort à redistribuer et, partant, accentue l'évolution en dent de scie de l'ouverture de fissure. Pour autant, on peut raisonnablement considérer que la deuxième phase, correspondant à l'apparition et la multiplication des fissures, s'étale de 20 kN à 60 kN.

On retiendra en substance qu'en dépit d'un meilleur contrôle de la fissuration (quelle que soit la solution retenue et qui se compare favorablement avec le CFRP) la cinématique de fissuration n'est pas significativement affectée. Aussi, dans la mesure où, dans le cas des poutres préalablement endommagées, l'ouverture de fissure apparaît dès le début du chargement la contribution du béton est marginale.



(a) Poutres initialement saines

(b) Poutres initialement endommagées

Figure 6. Evolution de l'ouverture de la première fissure apparue

S'agissant des espacements moyens des fissures (principales) établis uniquement sur la zone de moment constant (60 cm) il est donné par le tableau 2. L'apport du renfort est sensible comparativement à la poutre de référence et semble lié à la rigidité axiale des renforts, ainsi l'espacement moyen des fissures serait inversement proportionnel à la rigidité axiale du renfort (la faible variation incite toutefois à la prudence et nécessite une base expérimentale plus fournie pour valider ce constat).

Poutres	Poutre référence	TRC	TRC + JVC	TRC + JC	CFRP
Espacement de fissure moyen (cm)	13,3	10,8	8,9	8,5	7,1

Tableau 2. Ouverture moyenne des fissures en zone de flexion pure

4. Conclusion

Cet article a permis de mettre en avant les bonnes dispositions des solutions hybrides dans le cadre de la réparation des poutres en béton armé que ce soit en termes de comportement ultime ou de comportement en service avec des niveaux de performances très comparables aux solutions traditionnelles telles que le CFRP. Le recours aux seuls TRC dans le cadre du renforcement semble moins avantageux et,

bien qu'améliorant sensiblement les performances ultimes, ne permet pas de l'envisager dans le cadre de l'accroissement de la capacité portante mais se révèle intéressant dans l'optique dans du contrôle de la fissuration en phase de service.

Il est bon de souligner aussi la modification du mode de rupture dans le cas de solutions TRC et TRC + JVC qui autorise une meilleure valorisation du renfort. L'évolution du mode de rupture a été mise en rapport avec la faiblesse relative de la rigidité axiale du renfort, sous réserve de disposer d'une interaction suffisante avec le support béton. Enfin, au titre de la valorisation de ce type de solutions il est intéressant de souligner la possibilité de s'affranchir, sous réserve de recourir à un mortier thixotrope, de la résine structurale de collage compte tenu du bon comportement de la poutre TRC mise en œuvre à même le support.

5. Remerciements

Nous tenons à remercier la société TEXINOV pour la fourniture des renforts textiles.

6. Bibliographie

- Cuypers H., Wastiels J. Stochastic matrix-cracking model for textile reinforced cementitious composites under tensile loading ». *Materials and structures* 2005, 39:777-86.
- Hegger J., Voss S. « Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete ». *Engineering structures*, 2008, 30(7):2050-56.
- Peled A., Cohen Z, Pérez-Garcia, Di capua D, Pujades LG. « Influences of textile characteristics on the textile properties of warp knitted cement based composites ». *Cement and concrete composites*. 2008, 30(3):174-83.
- Si Larbi A., Contamine R., Ferrier E., Hamelin P., « Shear strengthening of RC beams with textile reinforced concrete (TRC) plate», *Construction and Building Materials*, Construction and Building Materials, Volume 24, Issue 10, October 2010, p. 1928-1936.
- Triantafillou TC., Papanicolaou CG. « Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets ». *Materials and structures*, 2006; 39(1): 93-103.
- Brückner A., Ortlepp R, Curbach M. « Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear ». *Materials and structures*. 2006, 39(8): pp.741-748.