
Confrontation de composites textile-mortier (TRC) à renfort carbone ou acier pour le renforcement d'éléments de maçonnerie

Contamine Raphaël¹, Plassiard Jean-Parick², Perrotin Pascal²

¹ Université Clermont Auvergne, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, BP 20206, F-63000 Clermont-Ferrand, France,
24, Avenue des Landais, BP 20206, 63174 Aubière Cedex, France
raphael.contamine@univ-bpclermont.fr

² Université de Savoie, LOCIE, CNRS, Polytech Annecy-Chambéry, Savoie Technolac, F-73000 Chambéry, France

RÉSUMÉ.

Une forte demande émerge concernant les techniques de renforcement de structures maçonnées existantes. En réponse, le renforcement par moulage au contact de composites à renfort textile et matrice cimentaire communément nommés textile-mortier (textile reinforced concrete, TRC) s'est développé au cours de ces cinq dernières années. Un essai permettant de caractériser le comportement en traction directe du TRC ainsi que le comportement de l'ancrage TRC/maçonnerie a été développé. Des TRC innovants renforcés par tissus d'acier inoxydable ont été testés et comparés à des TRC renforcés par grilles de carbone. Cette campagne d'essai a montré que le renforcement de structures maçonnées par moulage au contact de TRC renforcés par tissus d'acier inoxydable est technologiquement faisable. Les résultats opposent un comportement à l'arrachement ductile des TRC acier à un comportement fragile des TRC carbone. Cette différence de comportement est principalement liée à la différence de mode de rupture : les TRC carbone montrent un mode de rupture par arrachement (pull-out) entre le textile et la matrice tandis que les TRC acier rompent par un délaminage progressif de l'ancrage.

ABSTRACT.

A significant need for strengthening techniques of existing masonry structures is emerging. In response, the bonding of textile reinforced concrete (TRC) has been developed during recent years. To investigate the influence of the nature of the textile reinforcement, pull-out test between the TRC and the masonry has been developed. Two natures of textile reinforcement grids were tested: carbon and stainless steel. For all the fifteen specimens tested the displacement fields are measured by digital image correlation. This experiment showed that strengthening of masonry structures by contact moulding of TRC with stainless steel grids directly on the masonry is technologically feasible. The results show a different post-peak behaviour of the force – displacement curves: ductile for stainless steel TRC and brittle for carbon TRC. This different behaviour is not only related to the ductile behaviour of the stainless steel but also to a difference in the failure mode between the stainless steel TRC and the carbon TRC. The stainless steel TRC showed a failure mode by progressive delamination. It has the major benefits to be detectable with the naked eye and to allow high energy dissipation.

MOTS-CLÉS : textile-mortier, arrachement, traction, carbone, acier inoxydable, maçonnerie.

KEY WORDS: textile reinforced concrete, pull-out, tensile, carbon, stainless steel, masonry.

1. Introduction

Les structures en maçonnerie non renforcées ou sous renforcées représentent une proportion importante des structures en France et dans le monde. Ces ouvrages sont particulièrement sujets à la propagation de macro-fissures importantes, notamment dues au tassement différentiel des fondations (retrait, gonflement des argiles), au vent ou aux sollicitations sismiques. En réponse, le renforcement par moulage au contact de composites à renfort textile et matrice cimentaire communément nommés textile-mortier (textile reinforced concrete, TRC) s'est développé au cours de ces cinq dernières années [PRO 06], [HAR 10], [FEL 14], [RAZ 14] et [MAL 14]. Dans le cadre du renforcement de structures en béton armé ou en maçonneries, les TRC sont principalement sollicités en traction, même vis-à-vis du renforcement à l'effort tranchant [CON 13]. Toutefois, la caractérisation en traction directe des TRC n'en est pas moins insuffisante à rendre compte du comportement des composites TRC appliqués au renforcement de structures maçonnées. En effet, des études précédentes ont montrées que le comportement à l'arrachement entre le renfort textile et la matrice n'était pas considéré par la caractérisation en traction directe [CON 11] et [CON 14]. De plus, l'adhérence entre la maçonnerie et le TRC influence aussi le comportement du TRC de renforcement [ORT 06] et [ANT 14]. C'est dans ce contexte qu'un essai permettant de caractériser le comportement en traction directe du TRC ainsi que le comportement de l'ancrage TRC/maçonnerie a été développé. Cet essai permettra d'étudier l'ensemble des paramètres intervenant sur le comportement du TRC de renforcement sollicité en traction. Afin de permettre l'étude du comportement global et local, le champ de déplacement en fonction du chargement a été mesuré par corrélation d'images sur la surface des 15 corps d'épreuves testés. Toutefois, cet article exploite uniquement les résultats liés au comportement global.

Bien que cette étude ait été réalisée à température ambiante, elle constitue une étude préliminaire au développement de TRC résistants à des températures supérieures aux conditions normales : pour des températures supérieures aux températures de transition vitreuse des polymères couramment utilisés dans le domaine du renforcement structural. Dans ce cadre, les renforts textiles des TRC étudiés ne sont pas pré-imprégnés. Les bons résultats obtenus avec des TRC au renfort textile en carbone nous encourage à innover dans ce domaine et à viser dans cette étude le développement de techniques de réparation par TRC au comportement ductile. Pour parvenir à cet objectif, des TRC renforcés par des tissus en acier inoxydable (TRC acier) sont testés et comparés aux TRC « traditionnels » renforcés par des textiles en carbone (TRC carbone). En effet, la littérature a déjà étudié le renforcement de structures par des TRC aux renforts textile constitués de multi-filaments d'acier, mais ces TRC affichent un comportement fragile [FEL 14], [RAZ 14] et [MAL 14].

2. Matériaux et essais

2.1. Matériaux

La partie maçonnée des corps d'épreuves est réalisée à partir de briques creuses en terre cuite (POROTHERM GF R20®). Le fournisseur indique une classe de résistance RC 80 (1600 MN/ml) et une résistance caractéristique de design minimale "fb" de 10 MPa (pour un dimensionnement aux Eurocodes). Les briques de dimensions 500 mm de long, 299 mm de hauteur et 200 mm de profondeur sont assemblées par un mortier spécial d'un millimètre d'épaisseur.

La matrice des TRC est un mortier cimentaire précédemment développé pour la réparation et le renforcement des structures béton armé par TRC. Cette matrice thixotropique permet le moulage au contact des TRC sur des surfaces de formes et d'orientations quelconques. C'est un mortier formulé à partir d'un liant hydraulique (CEM I 52.5 N HTS), de la chaux vive ultra-fine, de fumée de silice, de sable siliceux 0/400 µm, de sable 400/800 µm et de poudre de polymère redispersible (3% de la masse de liant et des agrégats).

Les plats de composite TRC sont composés de la matrice décrite ci-dessus associée à un renfort textile. Deux types de renforts textiles ont été testés, un en fibres de carbone et un second en fils d'acier inoxydable (Figure 1). La grille de carbone a un espacement de 10 mm entre les multi-filaments (nombre de filaments par multi-filaments : 12000, diamètre des filaments : 7 µm, module d'Young : 230 GPa, déformation ultime : 2,1 %, résistance : 4900 MPa, résistance de la grille textile : 226 kN/m) maintenus par des thermo-fils thermocollés. La grille d'acier est réalisée à partir de mono-filaments d'un millimètre de diamètre tissés selon une trame de 5 mm (résistance de la grille : 123 kN/m, figure 2). La rigidité initiale de la grille d'acier est exactement identique à celle de la grille de carbone.

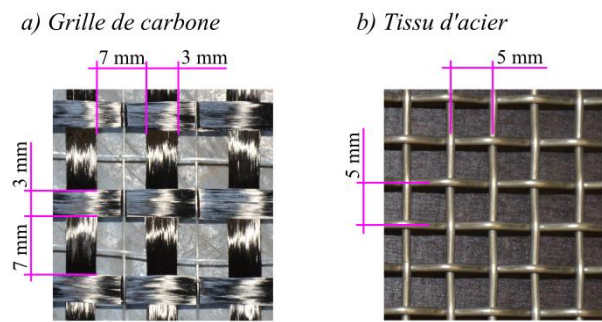


Figure 1. Illustration des deux types de renforts textiles

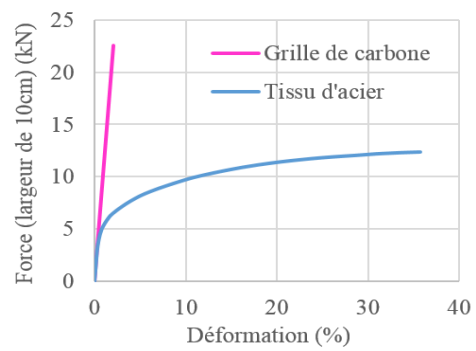


Figure 2. Courbes force-déformation en traction des renforts textiles (données fournisseurs). L'effort est donné pour une largeur de renfort textile de 10 cm.

2.2. Essai de caractérisation en traction et arrachement

La géométrie et les conditions limites de cet essai sont illustrées sur la figure 3. Le corps d'éprouve est composé d'une partie maçonnée (deux briques creuses) sur laquelle un plat de TRC est moulé au contact. Afin de permettre l'étude du comportement en traction directe du TRC, le plat de TRC est prolongé de 500 mm au-delà de la partie maçonnée. Des talons en aluminium sont collés par une résine époxy avec un décalage de 50 mm après la fin du plat TRC. Les TRC sont mis en œuvre selon les conditions de chantier, c'est-à-dire par un moulage au contact à la truelle et sans moule permettant d'assurer une épaisseur constante du composite. Ainsi l'épaisseur des TRC dépend du nombre de couches de renforts textiles ainsi que des imperfections de mise en œuvre.

L'effort est appliqué par un déplacement de 1 mm/min. Le champ de déplacement est mesuré en surface du plat de TRC par corrélation d'images (fréquence de prise d'images : 2 Hz) calculé par le logiciel 7D [VAC 99].

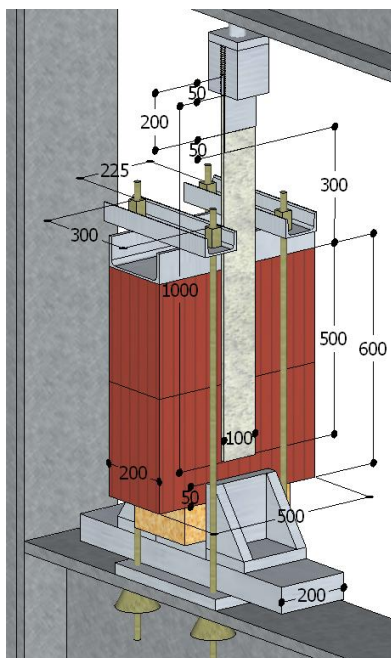


Figure 3. Illustration de l'essai

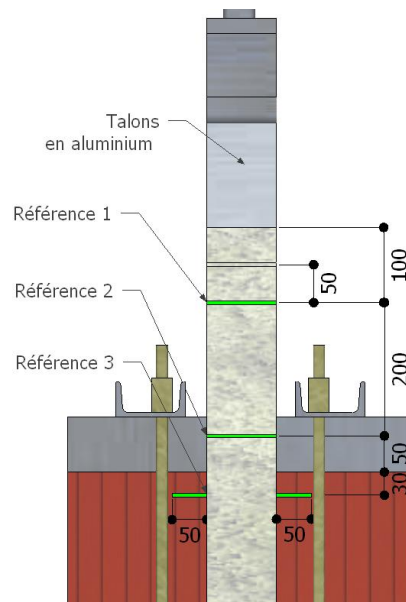


Figure 4. Position des points de référence pour les calculs de déplacement par corrélation d'images

2.3. Structurations de TRC testées

Pour chacun des deux types de renforts textiles testés, une étude paramétrique du taux de renfort a été conduite. Le tableau 1 définit la structuration des TRC testés (type de renfort textile, nombre de couches de renforts textiles dans l'épaisseur du TRC et épaisseur moyenne du TRC).

Tableau 1. Structuration de TRC testées

Nom des types de TRC	Nom de la structuration de TRC	Épaisseur moyenne des TRC (mm)	Type de textile	Nombre de couches de renforts	Taux de renfort volumique selon la direction longitudinale du TRC (‰)
TRC carbone	Carbone-1-i	4	Carbone	1	11,5
	Carbone-1-ii	4	Carbone	1	11,5
	Carbone-2-i	8	Carbone	2	11,5
	Carbone-2-ii	5	Carbone	2	18,5
TRC acier	Acier-1-i	4	Acier	1	39,3
	Acier-1-ii	4	Acier	1	39,3
	Acier-2-i	6	Acier	2	52,4
	Acier-2-ii	6	Acier	2	52,4
	Acier-3-i	7	Acier	3	67,3
	Acier-3-ii	7,5	Acier	3	62,8

2.4. Exploitation des mesures de champs de déplacement

La corrélation d'images permet de mesurer le champ de déplacement sur la surface des plats de TRC tout au long du chargement (fréquence de mesures de 2 Hz). Le comportement global en traction du TRC est caractérisé par la courbe de l'effort divisé par le nombre de couches de renforts textiles en fonction de la déformation moyenne du TRC. La déformation moyenne est calculée en divisant le déplacement moyen entre les lignes de références 1 et 2 (figure 4) par l'espacement entre ces lignes (200 mm). Le comportement global de l'ancrage entre le TRC et la maçonnerie est caractérisé par les courbes force-déplacement. Le déplacement considéré est celui calculé entre les lignes de références 2 et 3 (figure 4).

3. Résultats

3.1. Caractérisation en traction

Les courbes charge-déformation de l'ensemble des corps d'épreuves testés sont présentées sur la figure 5. Pour un nombre de renforts textiles identique et une épaisseur proche (tableau 1), les TRC acier sont plus rigides que les TRC carbone. Contrairement aux TRC carbone, les TRC acier montrent un comportement ductile marqué.

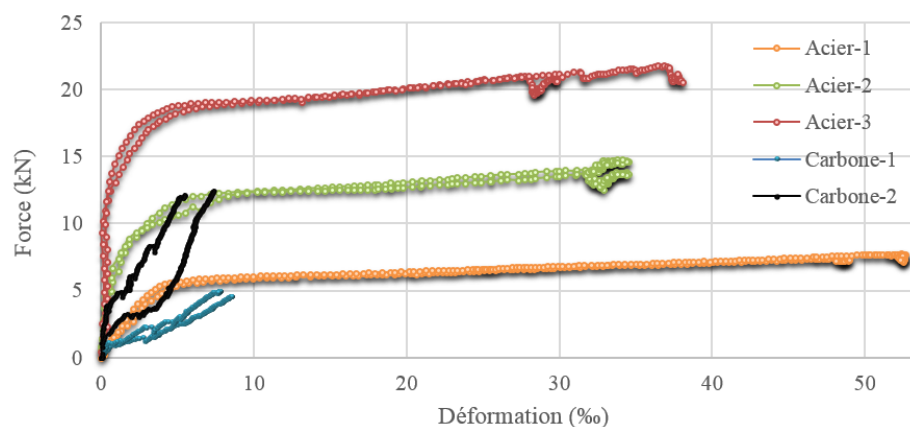


Figure 5. Ensemble des courbes charge-déformation en traction directe

Pour une déformation supérieure à 0.9 ‰ (et respectivement 1.8 ‰), les TRC carbone « Carbone-1 » (et respectivement « Carbone-2 ») affichent une rigidité globale (rapport entre l'effort et la déformation) inférieure à la rigidité des renforts textiles en carbone (à l'exception d'un corps d'épreuve Carbone-2, Figure 6). Ainsi la contribution aux performances mécaniques de la matrice cimentaire des TRC carbone est très limitée. Le taux de travail en résistance ($E_r\sigma$) des TRC est obtenu en calculant le rapport entre l'effort ultime du TRC et la résistance de ces renforts textiles (donnée par le fournisseur des renforts textiles § 2.1). Le taux de travail ainsi calculé des TRC carbone est très faible (entre 20% et 28%).

En confrontant les figures 6 et 7, il apparaît clairement que contrairement aux textiles carbone, les tissus d'acier permettent à la matrice cimentaire d'apporter une contribution significative aux performances mécaniques des TRC. En effet, pour une déformation inférieure à 10 ‰, la rigidité globale des TRC acier est significativement supérieure à celle des renforts textiles d'acier. De plus, les intersections entre les courbes charge-déformation des TRC acier et du renfort textile acier interviennent pour une déformation comprise entre 15 et 28 ‰ (comparativement à une déformation comprise 0.9 et 1.8 ‰ pour les courbes des TRC carbone). Cette différence de comportement entre les TRC carbone et les TRC acier est due à une meilleure adhérence de la matrice cimentaire avec le renfort textile en acier qu'avec le renfort textile en carbone. Cette différence d'adhérence intervient à différentes échelles : la différence d'adhérence entre les matériaux carbone et acier avec la matrice cimentaire, mais aussi la différence entre l'adhérence d'un fil multi-filaments et un mono-fil avec la matrice cimentaire. En effet, la littérature a montré que la matrice cimentaire ne pénètre pas au sein des fils multi-filaments [HEG 06], [HÄU 07] et [CON 14]. Ainsi pour un matériau, une section et un état de surface identique, l'adhérence d'un mono-fil avec la matrice cimentaire est largement supérieure à celle d'un fil multi-filaments. Enfin, la variation de la géométrie structurelle du renfort textile intervient aussi sur l'adhérence entre le textile et la matrice. Il a été montré dans la littérature que l'adhérence des tissus avec les matrices cimentaires était supérieure à celle des grilles [PEL 00]. Le taux de travail en résistance des TRC acier est indépendant du nombre de renforts textiles. Bien que ce taux de travail, de $60 \pm 3 \%$, soit plus de deux fois supérieure à celui des TRC carbone, il pourra être grandement optimisé.

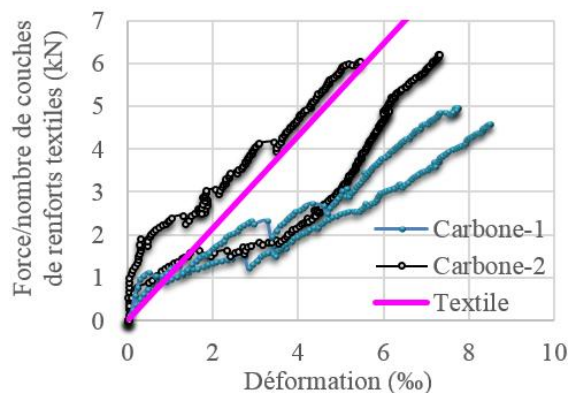


Figure 6. Courbes de la force divisée par le nombre de couches de renforts textiles en fonction de la déformation des TRC carbone

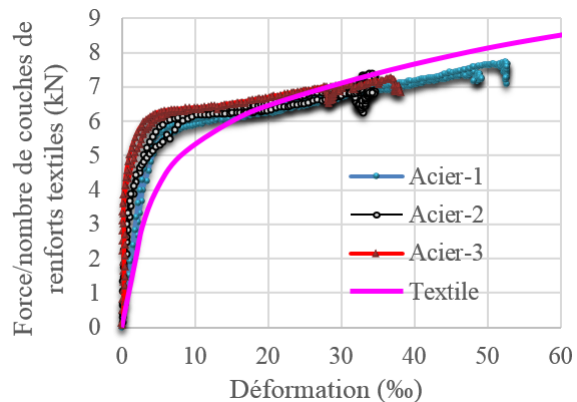


Figure 7. Courbes de la force divisée par le nombre de couches de renforts textiles en fonction de la déformation des TRC acier

3.2. Les modes de rupture

L'ensemble des TRC carbone testés ont affiché un mode de rupture localisé sur une fissure prédominante situé au début de la zone d'ancrage entre la maçonnerie et le TRC (figure 8). L'étude du comportement local par les mesures de champs réalisées par corrélation d'images a montré que ce mode de rupture intervient par arrachement (pull-out). Ce mode de rupture est déjà largement décrit dans la littérature scientifique [HEG 06], [CON 11], [CON 14] et [CON 15] et. D'autre part, l'ensemble des TRC acier testés ont montré un mode de rupture par une délamination qui se propage le long de l'ancrage des TRC (figure 9). La rupture de l'ancrage intervient lorsque la part d'ancrage non délaminé devient trop courte pour transmettre l'effort qui lui est appliqué à la maçonnerie.

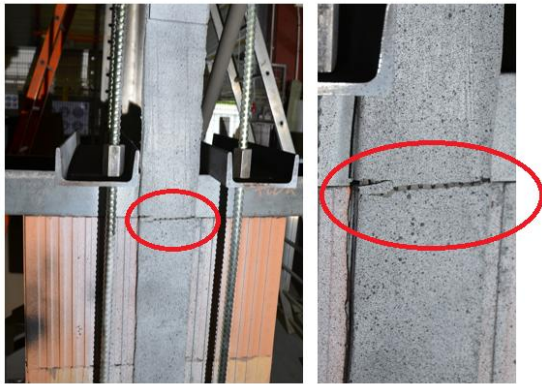


Figure 8. Illustration du mode de rupture du corps d'éprouve « Carbone-1-i », représentatif de l'ensemble des TRC carbone testés.



Figure 9. Illustration de la propagation du délaminage le long du corps d'éprouve « acier-2-ii », représentatif de l'ensemble des TRC acier testés.

3.3. Caractérisation de l'ancrage

Les courbes charge-déplacement de l'ancrage de l'ensemble des TRC testés sont illustrées sur la figure 10. De même que pour le comportement en traction directe, pour un même nombre de couches de renforts textiles et une épaisseur de composite similaire (tableau 1), les TRC aciers sont significativement plus rigides que les TRC carbone (figure 11). Contrairement aux TRC carbone, les TRC acier montrent un comportement ductile marqué.

Le comportement qualitatif initial des courbes de l'effort/nombre de couches des renforts textiles en fonction du déplacement de l'ancrage des TRC (figure 11) est proche de celui des courbes de l'effort/nombre de couches des renforts textiles en fonction de la déformation en traction directe (figure 6). Toutefois, pour les TRC carbone, contrairement aux courbes de traction directe, la dernière partie des courbes d'arrachement de l'ancrage est non linéaire. Cette non-linéarité est due au mode de rupture par arrachement (pull-out) des TRC carbone [CON 11]. Concernant les TRC acier, contrairement aux courbes de traction directe, la dernière partie des courbes d'arrachement de l'ancrage affiche un effort quasi-constant en fonction de l'augmentation du déplacement (palier de ductilité). Cette différence de comportement est due au mode de rupture par délaminage des TRC-acier. Le palier à effort quasi-constant ne peut pas être observé sur les courbes de traction directe car la délaminage se développe le long de l'ancrage pour un effort et une déformation constante de la partie de l'éprouvette sollicitée en traction directe.

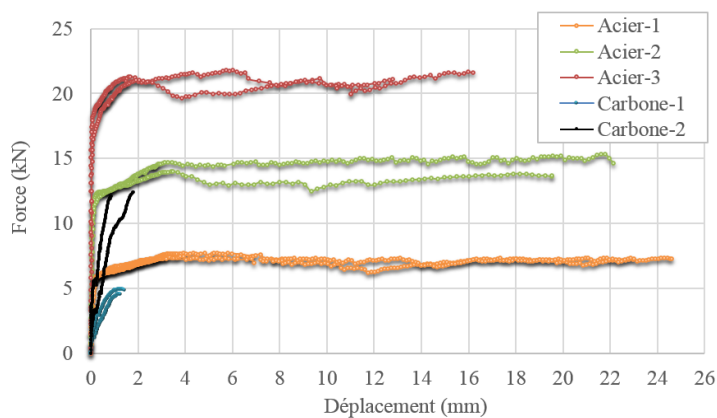


Figure 10. Courbes charge-déplacement de l'ancrage des TRC testés

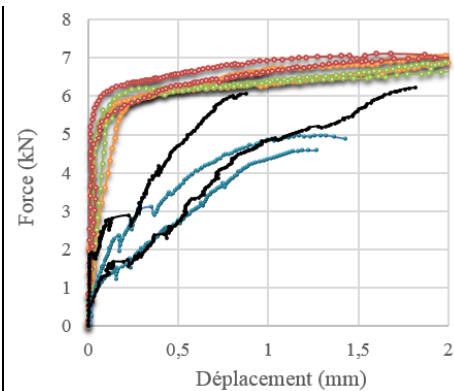


Figure 11. Courbes charge/nombre de couches des renforts textiles en fonction du déplacement de l'ancrage des TRC testés (grossissement sur les 2 premiers)

| millimètres du déplacement)

4. Conclusions

Cette campagne d'essais a montré que le renforcement de structures maçonnées par moulage au contact de TRC à renfort textile en acier est technologiquement faisable. Bien que la rigidité initiale du renfort textile en acier soit identique à celle du renfort textile en carbone, les TRC acier affichent une rigidité globale supérieure à celle des TRC carbone. De plus, le taux de travail en rigidité des TRC acier est plus de deux fois supérieure à celui des TRC carbone. Les résultats expérimentaux montrent une différence de comportement post-pic des courbes force-déplacement : un comportement ductile pour les TRC acier et un comportement fragile pour les TRC carbone. Cette différence de comportement n'est pas uniquement liée à la ductilité de l'acier mais elle est principalement liée à la différence de mode de rupture entre les deux types de composites. Les TRC carbone montrent un mode de rupture par arrachement (pull-out) entre le textile et la matrice tandis que les TRC acier rompent par un délaminage progressif de l'ancrage. Il en ressort principalement que comparativement au TRC carbone, le TRC acier présente les avantages suivants :

- Un mode de rupture ductile et prévisible à « l'œil nu ».
- Une évaluation possible et simple des dommages en cas de sollicitations accidentelles.
- Un mode de rupture entraînant une forte dissipation d'énergie.

Le comportement de la dernière partie des courbes force-déplacement obtenues en traction directe diffère de celui des courbes obtenues à l'arrachement de l'ancrage. De ce fait, pour les deux types de TRC testés, sujets à un chargement par arrachement, il existe un seuil de chargement au-dessus duquel la seule caractérisation en traction directe du TRC n'est plus appropriée pour le dimensionnement. Dans le cadre du renforcement structural, il est important de noter que le pontage d'une macro-fissure d'une structure par un composite TRC pourra conduire à un chargement par arrachement de ce TRC. Enfin, le TRC acier proposé dans cet article pourra être fortement optimisé. En effet, le taux de travail en résistance de ce TRC reste faible (60 ± 3 %) et la déformation ultime des TRC acier (qui varie entre 3.4 % and 5.3 %) est très inférieure à la déformation ultime des tissus d'acier (36 %).

5. Bibliographie

- [ANT 14] D'ANTINO T., CARLONI C., SNEED L.H., PELLEGRINO C., « Matrix–fiber bond behavior in PBO FRCM composites: A fracture mechanics approach », *Eng. Fract. Mech.* vol. 117, 2014, p. 94–111.
- [CON 11] CONTAMINE R., SI LARBI A., HAMELIN, P., « Contribution to direct tensile testing of textile reinforced concrete (TRC) composites », *Mater. Sci. Eng.* vol. 528, 2011, p. 8589–8598.
- [CON 13] CONTAMINE R., SI LARBI A., HAMELIN, P., « Identifying the contributing mechanisms of textile reinforced concrete (TRC) in the case of shear repairing damaged and reinforced concrete beams », *Eng. Struct.*, vol. 46, 2013, p. 447–458.
- [CON 14] CONTAMINE R., JUNES A., SI LARBI, A., « Tensile and in-plane shear behaviour of textile reinforced concrete: Analysis of a new multiscale reinforcement », *Constr. Build. Mater.* vol. 51, 2014, p. 405–413.
- [CON 15] CONTAMINE R., SI LARBI, A., « Development of a textile reinforced concrete (TRC) to retrofit reinforced concrete structures », *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, DOI : 10.1080/19648189.2015.1030089, 2015.
- [FEL 14] DE FELICE, G., DE SANTIS, S., GARMENDIA, L., GHIASSI, B., LARRINAGA, P., LOURENÇO, P.B., OLIVEIRA, D.V., PAOLACCI, F. AND PAPANICOLAOU, C.G., « Mortar-based systems for externally bonded strengthening of masonry », DOI 10.1617/s11527-014-0360-1, *Mater. Struct.*, 2014.
- [HAR 10] HARAJLI M., EIKHATIB H., SAN-JOSE J.T., « Static and cyclic out-of-plane response of masonry walls strengthened using textile-mortar system », *J. Mater. Civ. Eng.* vol. 22, n°11, 2010, p. 1171–80.
- [HÄU 07] HÄUBLER-COMBE U., HARTIG J., « Bond and failure mechanisms of textile reinforced concrete (TRC) under uniaxial tensile loading », *Cement and concrete composites*, vol. 29, n° 4, 2007, p. 279-289.
- [HEG 06] HEGGER J., WILL N., BRUCKERMANN O., VOSS, S., « Load-bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete », *Mater. Struct.* Vol. 39, 2006, p. 765–776.

- [MAL 14] MALENA M., DE FELICE, G., « Debonding of composites on a curved masonry substrate: Experimental results and analytical formulation », *Compos. Struct.* Vol.112, 2014, p. 194–206.
- [ORT 06] ORTLEPP R., HAMPEL U., CURBACH, M., « A new approach for evaluating bond capacity of TRC strengthening », *Cement Concrete Comp.* Vol. 28, 2006, p. 589–597.
- [PEL 00] : PELED A., BENTUR A., « Geometrical characteristics and efficiency of textile fabrics for reinforcing cement composites », *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n° 5, 2000, p. 781-790.
- [PRO 06] PROTA A., MARCARI G., FABBROCINO G., MANFREDI G., ALDEA, C. « Experimental in-plane behavior of tuff masonry strengthened with cementitious matrix grid composites », *J. Compos. Constr.* Vol.10, n°3, 2006, p. 223–33.
- [RAZ 14] RAZAVIZADEH A., GHIASSI B., OLIVEIRA D.V., « Bond behavior of SRG-strengthened masonry units: Testing and numerical modeling », *Constr. Build. Mater.* vol. 64, 2014, p. 387–397.
- [VAC 99] VACHER P., DUMOULIN S., MORESTIN F., MGUIIL-TOUCHAL S., « Bidimensional strain measurement using digital images ». *Proc Inst Mech Eng.* vol. 2013, 1999, p. 811–7.