
Identification du comportement local interne des composites à matrice cimentaire par un capteur fibre optique

Mohamed Saidi¹, Aron Gabor²

¹ Laboratoire des matériaux composites pour la construction (LMC2), Université Lyon 1, mohamed.saidi@univ-lyon1.fr

² Laboratoire des matériaux composites pour la construction (LMC2), Université Lyon 1, aron.gabor@univ-lyon1.fr

RÉSUMÉ. Les matériaux composites à matrice cimentaire et renfort textile sont l'une des solutions à fort potentiel de réparation et renforcement des structures de génie civil. Ce type de composite est caractérisé par des propriétés mécaniques adéquates et une facilité de mise en œuvre exceptionnelle. Son comportement mécanique a fait l'objet de plusieurs études dans le but de le caractériser et de comprendre les paramètres régissant son comportement. Cependant, ces études sont limitées généralement à des techniques de mesure focalisées sur la surface des éprouvettes, puis le comportement interne est déduit par des approches de la mécanique des milieux continus et de la rupture.

Ce travail consiste à mesurer localement la déformation interne d'un composite à matrice cimentaire, en utilisant des fibres optiques comme capteur de déformation répartie, et d'en déduire le comportement interne de la matrice et du renfort textile au cours d'un essai de traction. Les résultats obtenus sont confrontés avec les approches théoriques utilisées pour la modélisation du comportement de ce type de composite.

ABSTRACT. Composite materials made of cementitious matrix and textile reinforcement are one of the potential solutions for repairing and reinforcing civil engineering structures. This kind of composite is characterised by relatively high mechanical properties and exceptional ease of use. Its mechanical behaviour has been the subject of several studies in order to observe and to establish parameters governing its behaviour. However, these studies are generally limited to measurement techniques assessing the strain and stress state on the surface of specimens. The internal behaviour is deduced using continuum mechanics and failure approaches.

This work consists of measuring locally the internal strain of a cementitious matrix composite, using optical fibres as a distributed strain sensor, and deducing the internal behaviour of the matrix and textile reinforcement during a tensile test. The obtained results are compared with theoretical approaches used for the modelling of the mechanical behaviour of this type of composite.

MOTS-CLÉS : composite à matrice cimentaire, comportement mécanique interne, fibre optique, loi des mélanges, déformation interne, interaction fibre-matrice.

KEY WORDS: cementitious matrix composite, internal mechanical behaviour, optical fibre sensor, law of mixtures, internal strain, fibre-matrix interaction.

1. Introduction

Les matériaux composites à matrice cimentaire sont de plus en plus utilisés pour la réparation et le renforcement des systèmes de composants structuraux du génie civil. La caractérisation du comportement mécanique du TRCMC (Textile Reinforced Cementitious Matrix Composite) est obtenue par l'intermédiaire de différentes techniques de mesure qui se focalisent généralement sur la surface des éprouvettes, comme les jauges de déformation, la corrélation d'images, LVDT, laser, etc ([CAG 17], [CON 11], [PRO 11]). A partir de ces mesures, les interactions internes de ces composites sont déduites par des approches de la mécanique des milieux continus et de la rupture, ce qui a permis d'établir des hypothèses et des modèles décrivant les éventuels paramètres micro-mécaniques qui régissent l'interaction renfort/matrice des TRCMC.

Grace aux avantages géométriques et extensométriques de la fibre optique (petit diamètre, flexibilité, légèreté, précision, résolution spatiale millimétrique, sensibilité...), cette technique de mesure a été utilisée dans plusieurs domaines, y compris le génie civil. Elle est utilisée comme un moyen d'auscultation de l'état des constructions ([HEN 13], [RAO 99]), et elle a été l'objet de plusieurs études, dont son comportement au cœur des structures en béton [TIX 13].

Concernant l'étude du comportement mécanique des composites, l'utilisation de la fibre optique comme un capteur de déformation a fait l'objet dans plusieurs investigations expérimentales [BRU 18], notamment le réseau de Bragg. Des composites à matrices polymères renforcées par textile, comme les FRP [WOO 17], et d'autres à matrice thermoplastique [BAE 09], ont été étudiés à l'aide des fibres optiques. Cependant, jusqu'à présent, aucune étude expérimentale avec ces capteurs de fibres optiques n'est consacrée aux composites à matrice cimentaire.

L'objectif de cette étude est de déterminer expérimentalement le comportement interne des composites TRCMC, en se basant sur des mesures locales au cœur du matériau testé. Pour cela, des fibres optiques basées sur le principe de la rétrodiffusion de Rayleigh [SOL 05] sont utilisées comme des capteurs de déformation réparti, noyées au cœur des composites TRCMC, permettant d'obtenir localement le comportement mécanique de la matrice et du renfort textile, avant et après fissuration. Les résultats obtenus sont confrontés avec les hypothèses de la loi des mélanges afin d'examiner sa validité.

2. Matériaux et protocole expérimental

2.1. Matériaux

2.1.1. Matrice cimentaire

Dans le but de faciliter la préparation, de minimiser les défauts géométriques des éprouvettes TRCMC et de ne pas endommager la fibre optique, une matrice cimentaire ettringitique, liquide et autoplaçante est utilisée. Les caractéristiques mécaniques de la matrice cimentaire sont synthétisées dans le tableau 1.

2.1.2. Renfort textile

Le textile de renfort utilisé dans cette étude est une grille de verre alcali-résistant (AR), avec un poids surfacique de 525 g/m² et des mailles de 5×5 (mm²). Le tableau 1 présente les principales caractéristiques mécaniques de ce textile à partir des essais de caractérisation réalisés au laboratoire.

Tableau 1. Propriétés mécaniques de la matrice et du renfort textile utilisés.

Matériau	$\sigma_{\text{comp.ultime}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{traction}\cdot\text{max}}$ (MPa)	$\epsilon_{\text{comp.ultime}}$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	$\epsilon_{\text{traction.ultime}}$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	$E_{\text{c comp}}$ (MPa)	$E_{\text{t traction}}$ (MPa)
Matrice	40	4.5	3000	400	13000	14000
Textile	-	520	-	1.5	-	35000

2.2. Protocole expérimental

2.2.1. Machine de traction

L'essai de traction étudié dans ce travail est mis en œuvre grâce à la machine Zwick montrée sur la Figure 1. Elle a une capacité maximale de 65kN, équipée des capteurs de force et de déplacement. L'ensemble est lié à un

ordinateur permettant la programmation de l'essai et l'acquisition des résultats. L'essai est piloté en déplacement, avec une vitesse de 0.1 mm/min.

2.2.2. Acquisition des données de la fibre optique

Dans ce travail, l'appareil ODiSI-B LUNA (Optical Distributed Sensor Interrogator) est utilisé comme moyen d'acquisition des déformations issues de la fibre optique. Cette dernière est basée sur le principe OFDR-Rayleigh. Il est possible de calibrer la fibre optique au début de l'essai afin d'éliminer les déformations résiduelles, ainsi que de visualiser instantanément les résultats. Pour notre étude, la résolution spatiale est de 2.6 mm sur toute la portée de la fibre optique (2m), avec une fréquence d'enregistrement de 2Hz.

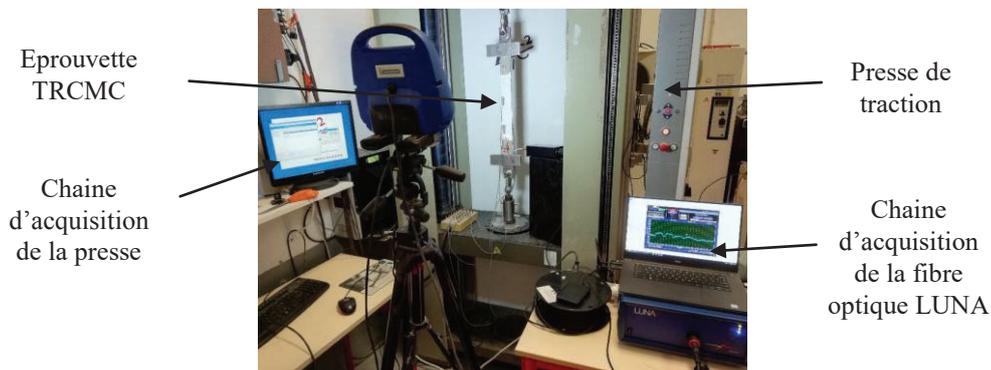


Figure 1. Protocole expérimental de l'essai de traction des TRCMC avec fibre optique.

2.2.3. Préparation des éprouvettes

La préparation des éprouvettes consiste à former un moule rectangulaire de PVC de dimensions 60 cm de longueur, 5 cm de largeur et 1 cm de hauteur. Un soin particulier est accordé à la mise en place de la fibre optique au milieu de la matrice et sur le textile, comme schématisé sur la Figure 2-a. Une fois le moule préparé et le textile avec la fibre optique placée (Figure 2-b), la matrice cimentaire est coulée. Après décoffrage, deux talons d'aluminium sont collés aux deux extrémités des éprouvettes pour la réalisation de l'essai de traction. Les détails de préparation (insertion et fixation de la fibre optique, coulage de la matrice...) sont présentés par [SAI 19].

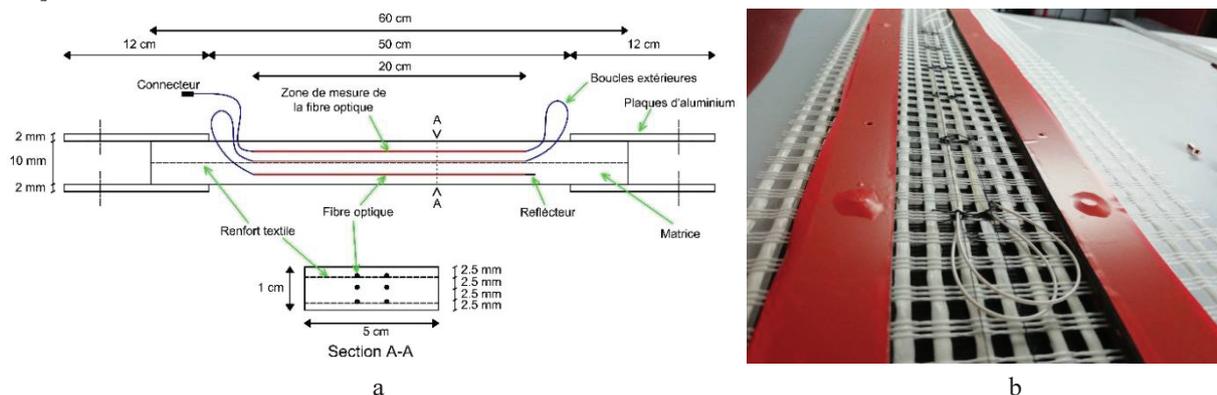


Figure 2. Préparation du TRCMC avec fibre optique : (a) Schéma du TRCMC avec l'emplacement de la fibre optique ; (b) TRCMC avec fibre optique en place

3. Résultats et discussion

Les résultats issus de la fibre optique sont présentés sur les Figure 3a et 3b. La première présente la courbe contrainte déformation pour le textile et la matrice, tandis que la deuxième donne l'évolution du champ de déformation le long de l'éprouvette.

3.1. Zone de pré-fissuration

Conformément à la littérature, la zone de pré-fissuration présente un comportement quasi-linéaire en termes de contrainte-déformation. Le comportement de la matrice et du textile dans cette zone est quasi-identique, et les valeurs des déformations enregistrées des deux composants pour un effort donné sont presque identiques.

Afin de confronter les résultats expérimentaux et les valeurs obtenues en appliquant la loi des mélanges, les auteurs ont choisi de travailler en termes de module de Young E_1 de la zone de pré-fissuration. Les résultats sont résumés dans le tableau 2. Ce tableau montre qu'il y a une différence de 4.68 % entre l'expérimental et la loi des mélanges. Cette différence peut être expliquée par les imperfections géométriques de l'éprouvette, ce qui influence sur la valeur de la section transversale, et donc sur la contrainte composite puis sur le module E_1 .

En conclusion, et d'après ces résultats expérimentaux, la loi des mélanges peut être appliquée en première zone du comportement du composite TRCMC, à condition de maîtriser au mieux possible les caractéristiques géométriques de l'éprouvette, ainsi que de savoir les propriétés mécaniques le plus précisément possible de la matrice et du textile.

Tableau 2. Comparaison entre la valeur expérimentale de E_1 , et celle calculée par la loi des mélanges

Taux de renfort V_f (%)	E_m matrice (MPa)	E_f textile (MPa)	Valeur expérimentale E_1 (MPa)	Loi des mélanges E_1 (MPa)	Différence (%)
4.8	14000	35000	14336	15008	4.68

3.2. Zone de post-fissuration

En se référant aux résultats présentés sur la Figure 3a, on remarque que sur la zone de post-fissuration du TRCMC, le textile reprend tout l'effort appliqué durant cette zone, alors que la matrice reste tendue, mais sa déformation n'augmente plus, voir une minime diminution est enregistrée. Ces constatations concordent avec les hypothèses de la loi des mélanges concernant le comportement de cette zone. En plus, à l'emplacement de la fissure (Figure 3b), le renfort textile reprend l'effort complet appliqué au composite, et donc la matrice n'a plus de contribution à ce point, ce qui explique la grande déformation du renfort textile enregistrée à l'emplacement de la fissure.

Afin de comparer le comportement en traction du textile au cœur du TRCMC en zone de post-fissuration vis-à-vis du comportement en traction d'un textile seul, une confrontation des valeurs des modules de Young est résumée dans le tableau 3. A noter que pour avoir le module de Young du renfort au cœur du TRCMC (E_{3f}), on divise le module du composite E_3 par le taux de renfort V_f .

A partir de ces résultats, on peut confirmer qu'en troisième zone, le textile reprend la totalité de la force appliquée durant cette zone. Cet effort s'ajoute à celui appliqué durant les zones précédentes pour constituer l'effort total repris par le textile. En revanche, la matrice garde généralement la valeur de déformation après l'apparition de la dernière fissure. De plus, comme mentionné dans plusieurs études ([CAG 17], [CON 11]), ce comportement explique l'augmentation de l'ouverture de fissure observée durant la zone de post-fissuration.

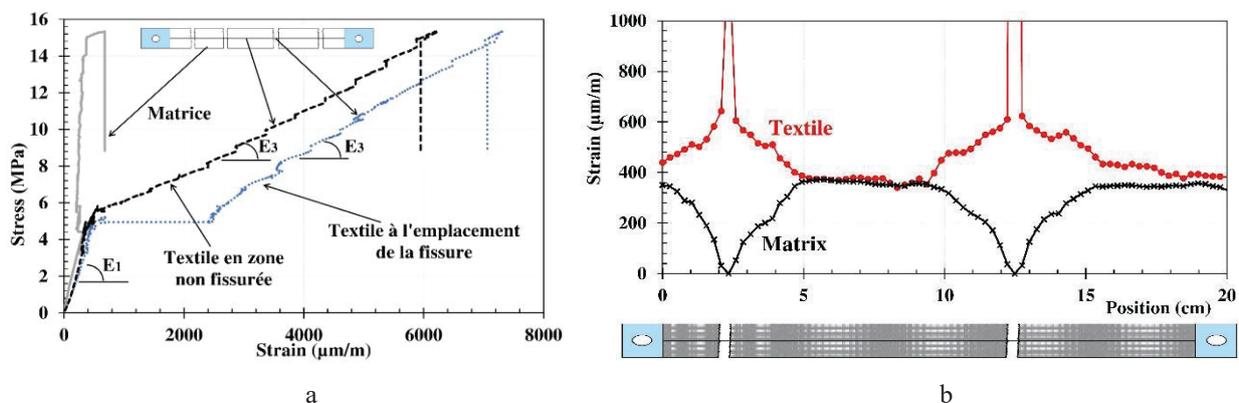


Figure 3. Résultats mesurés par fibre optique : (a) Comportement local interne de la matrice et du textile du TRCMC ; (b) déformation linéaire de la matrice et du textile le long de l'éprouvette TRCMC

Tableau 3. Comparaison entre la valeur expérimentale de E_3 , et celle calculée la loi des mélanges

Taux de renfort V_f (%)	E_m matrice (MPa)	E_f textile (MPa)	Valeur expérimentale E_3 (MPa)	$E_f = E_3 / V_f$ (MPa)	Différence (%)
4.8	14000	35000	1700	35417	1.17

4. Conclusion

Expérimentalement, le comportement local en traction simple des composites TRCMC est abordée dans ce travail, en utilisant des fibres optiques réparties comme des capteurs de déformation, noyées au cœur de ces composites.

Grace aux avantages de la mesure de déformation par cette nouvelle technique, les comportements de la matrice et du textile au cours d'un essai de traction du TRCMC ont été mesuré, identifié et confronté aux hypothèses de la mécanique des composites. Les principaux résultats sont listés ci-après :

- En zone de pré-fissuration du TRCMC, les comportements mécaniques de la matrice et du renfort textile sont approximativement identiques, caractérisés par une rigidité quasi-linéaire. La validité de la loi des mélanges dans cette zone est démontrée et l'hypothèse d'une liaison parfaite entre matrice et textile est validée.
- En zone de post-fissuration, le textile reprend presque la totalité de l'effort appliqué, et la matrice reste tendue en gardant sa déformation subie au cours des phases précédentes. Les résultats obtenus permettent d'appliquer globalement les hypothèses de la loi des mélanges, mais la sollicitation du renfort textile et maximale à l'endroit des fissures et explique l'augmentation des ouvertures de fissures observée. L'analyse des informations à l'endroit des fissures permet d'obtenir les paramètres micromécaniques décrivant les mécanismes de transfert de charge tels que longueur de transfert de charge, distribution de contrainte de cisaillement, contrainte résiduelle, etc.

5. Bibliographie

[BAE 09] DE BAERE I., LUYCKX G., VOET E., VAN PAEPEGEM W., DEGRIECK J., « On the feasibility of optical fibre sensors for strain monitoring in thermoplastic composites under fatigue loading conditions », *Optic and Laser in Engineering*, 2009, n°47, p. 403-411.

[BRU 18] BRUNO L., « Mechanical characterization of composite materials by optical techniques: A review », *Optic and Laser in Engineering*, 2018, n°104, p. 192-203.

[CAG 17] CAGGEGI C., LANOYE E., DJAMA K., BASSIL A., GABOR A., « Tensile behaviour of a basalt TRM strengthening system: Influence of mortar and reinforcing textile ratios », *Composite Part B: Engineering*, 2017, n° 130, p. 90-102.

[CON 11] CONTAMINE R., SI LARBI A., HAMELIN P., « Contribution to direct tensile testing of textile reinforced concrete (TRC) composites », *Materials Science and Engineering: A*, 2011, n° 528, p. 8589-8598.

[HEN 13] HENAULT J.M., Approche méthodologique pour l'évaluation des performances et de la durabilité des systèmes de mesure réparties de déformation : application à un câble à fibre optique noyé dans le béton, Thèse de doctorat, Université Paris-Est-France, 2013.

[RAO 99] RAO Y., « Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors », *Optic and Laser in Engineering*, 1999, n° 31, p. 297-324.

[PRO 11] PROMIS G., GABOR A., HAMELIN P., « Analytical modeling of the bending behavior of textile reinforced mineral matrix composite beams », *Composite Structure*, 2011, n° 93, p. 792-801.

[SAI 19] SAIDI M., GABOR A., « Use of distributed optical fibre as a strain sensor in textile reinforced cementitious matrix composites », *Measurement*, 2019, n° 140, p. 323-333.

[SOL 05] SOLLER B.J., GIFFORD D.K., WOLFE M.S., FROGGATT M.E., « High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies », *Opt. Express*, 2005, n°13, p. 666.

[TIX 13] TIXIER A., ROSPARS C., DUFOUR F., KHADOUR A., MASSON B., « Analyse des déformations par fibres optiques le long de l'interface acier-béton dans un essai push-in », *31èmes Rencontres de l'AUGC*, ENS Cachan, France, 2013.

[WOO 17] WOODS J.E., LAU D.T., BAO X., LI W., « Measuring strain fields in FRP strengthened RC shear walls using a distributed fiber optic sensor », *Engineering Structure*, 2017, n°152, p. 359-369.