

Etude expérimentale des mécanismes de transfert de charge à l'interface textile/matrice des composites à matrice cimentaire

Mohamed SAIDI¹,

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

RESUME Ce papier présente une étude expérimentale des mécanismes de transfert de charge à l'interface textile/matrice des composites à matrice cimentaire (TRC : Textile Reinforced Concrete). Ces interactions micromécaniques englobent le comportement mécanique local en traction de la matrice et du textile au cœur du TRC, la longueur de transfert de charge et la contrainte de cisaillement à l'interface textile/matrice. L'ensemble de ces mécanismes constituent des paramètres clés pilotant le comportement fissurant des TRC, les ouvertures et les espacements entre fissures. Dans ce sens, trois configurations du TRC ont été testé avec trois différents taux de renfort : une, deux et trois couches de renfort. Ces composites ont été instrumenté par des capteurs à fibre optique distribuée, noyés au cœur des éprouvettes. Ces capteurs, basés sur le principe de la rétrodiffusion de Rayleigh, ont permis de mesurer les déformations de la matrice et du textile, avant, pendant et après propagation des fissures, avec une résolution spatiale millimétrique. L'ensemble des résultats obtenus ont permis d'identifier, de quantifier et d'analyser les différents paramètres micromécaniques pilotant le comportement fissurant des TRC.

Mots-clés Composites à matrice cimentaire, capteurs à fibre optique, fissuration, longueur de transfert de charge, interface textile/matrice.

I. INTRODUCTION

Les matériaux composites à matrice cimentaire (TRC : Textile Reinforced Concrete) sont de plus en plus utilisés pour la réparation et le renforcement des ouvrages et des éléments structurels de génie civil. Le comportement mécanique du TRC est obtenu par différentes techniques de mesure classiques qui permettent de quantifier le champ de déplacement et de déformation à la surface du corps d'épreuve, comme les jauges, la corrélation d'images numériques (DIC), les LVDT, l'extensométrie laser, etc. (Caggegi et al., 2018). A partir de ces mesures, les interactions mécaniques internes et le transfert de charge entre les composants des TRC sont déduites par des approches de la mécanique des milieux continus et de la rupture. Celles-ci ont permis de développer des

hypothèses et des modèles décrivant les paramètres micromécaniques potentiels qui régissent l'interaction renfort/matrice d'un TRC, comme la contrainte de cisaillement et la longueur de transfert de charge (Aveston and Kelly, 1973; Cuypers and Wastiels, 2006). Cette dernière représente la longueur le long de laquelle la charge est transférée du renfort textile à la matrice. Elle pilote à la fois l'ouverture et l'espacement entre fissures du TRC.

Au vu de l'importance de la connaissance de ces paramètres micromécaniques pour mieux comprendre le comportement fissurant des TRC et évaluer la précision des modèles existants, une mesure expérimentale directe au cœur de ces composites est nécessaire. Dans ce sens, la technique de mesure basée sur les capteurs à fibre optique présente des avantages géométriques et métrologiques permettant de répondre à ce besoin de caractérisation expérimentale (petite taille, flexibilité, légèreté, précision, résolution spatiale millimétrique, sensibilité, etc.). Cette technique est utilisée dans plusieurs domaines, dont le génie civil. Elle a été utilisée comme outil d'évaluation de l'intégrité structurelle et le monitoring des ouvrages de génie civil (Henault, 2013).

L'objectif de ce travail est d'étudier expérimentalement le comportement interne des composites TRC, sur la base de mesures locales au cœur du matériau testé, et de déduire l'évolution de la longueur de transfert de charge et le comportement de l'interface textile/matrice avant, pendant et après propagation des fissures du TRC soumis à la traction. Pour cela, des fibres optiques basées sur le principe de rétrodiffusion de Rayleigh (Soller et al., 2005) sont utilisées comme capteurs de déformation distribués, incorporés au cœur du TRC. Les résultats obtenus ont permis d'analyser et de comprendre le rôle les deux paramètres micromécaniques objet de cette étude, ainsi que l'effet du taux de renfort sur le comportement fissurant des TRC.

II. TRAVAIL EXPERIMENTAL

A. Dispositif expérimental

1) Machine de traction Zwick

Les essais de traction ont été réalisés à l'aide d'une machine d'essai universelle Zwick (Fig. 1). Ces essais ont été contrôlés en déplacement, avec une vitesse de 0.1 mm/min. La transmission de charge de à Zwick au TRC a été faite par l'intermédiaire de deux mors à rotule afin de réduire les effets de la flexion parasite due aux éventuelles imperfections géométriques des éprouvettes.

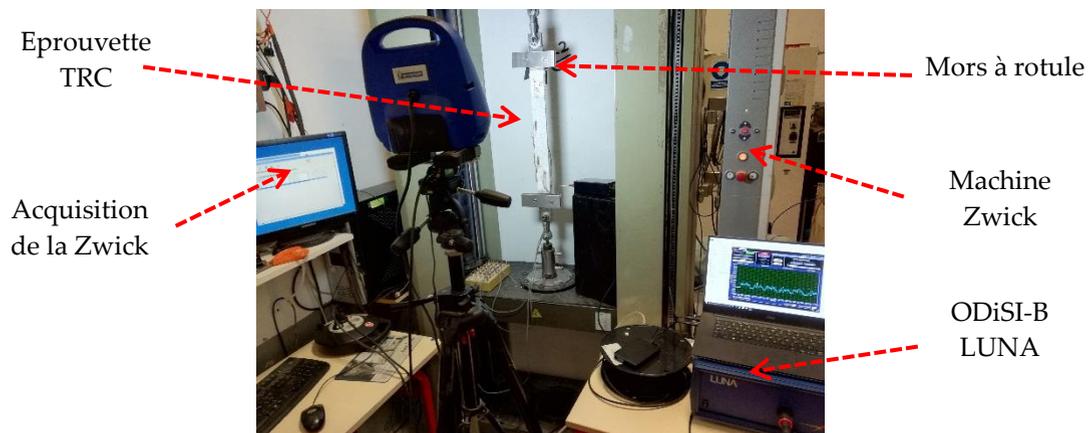


FIGURE 1. Protocole expérimental pour l'essai de traction des TRC équipées par des fibres optiques

2) Capteurs à fibres optiques distribuées

Dans ce travail, le dispositif ODISI-B LUNA (Optical Distributed Sensor Interrogator) est utilisé pour acquérir les déformations mesurées par la fibre optique. La mesure est basée sur le principe de l'OFDR-Rayleigh. La fibre optique a été calibrée au début de l'essai afin d'éliminer les déformations résiduelles, ainsi que pour visualiser instantanément les résultats. Pour notre étude, la résolution spatiale choisie est de 2.6 mm sur toute la portée de la fibre optique (2 m), avec une fréquence d'acquisition de 2 Hz.

B. Propriétés des éprouvettes TRC

1) Propriétés des matériaux

- Matrice

Afin de faciliter la préparation des éprouvettes, de minimiser les défauts géométriques des TRC et de s'éviter l'endommagement de la fibre optique, une matrice cimentaire à base d'ettringite, liquide et autoplçante a été utilisée. Ces propriétés ont permis d'obtenir une bonne maniabilité et d'assurer un bon enrobage du renfort textile par la matrice cimentaire. Les propriétés mécaniques de la matrice cimentaire sont présentées dans le Tableau 1.

- Renfort textile

Le renfort textile utilisé dans cette étude est un textile de verre AR d'une forme de grille, d'un poids surfacique de 525 g/m² et d'une ouverture de maille de 5×5 mm². Les fils de la grille ont un Tex de 2400 dans le sens de la trame et de 272 dans le sens de la chaîne. Les fils dans le sens de la trame ont une aire moyenne de la section transversale de $S_f = 2.2 \text{ mm}^2$ et un périmètre moyen de $P_f = 7 \text{ mm}$. Le Tableau 1 présente les principales propriétés mécaniques de ce textile, mesurées au laboratoire.

TABLEAU 1. Propriétés mécaniques de la matrice cimentaire et du renfort textile

Composant	Paramètre	σ_{ultime} compression (MPa)	σ_{ultime} traction (MPa)	ϵ_{ultime} compression ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_{ultime} traction ($\mu\text{m/m}$)	E_c compression (MPa)	E_t traction (MPa)
Matrice	Moyenne	40	4.5	3000	400	13000	14000
	Ecartype	1.57	0.36	230	34	507	492
Textile	Moyenne	-	520	-	1.5	-	35000
	Ecartype	-	48	-	0.12	-	3180

2) Préparation des éprouvettes TRC

Afin de mesurer la déformation interne du TRC, la fibre optique de 2 m de long a été placée dans six positions différentes suivant l'épaisseur du TRC, avec une longueur de mesure effective de 20 cm par segment. Ces derniers sont liés par des boucles mises à l'extérieure des éprouvettes, comme le montre la Fig.2.

Les TRC étudiés ont une forme parallépipédique rectangulaire avec des dimensions approximatives de 600 × 50 × 10 mm³ ($\pm 1 \text{ mm}$) (longueur × largeur × épaisseur). Cette forme a été choisie sur la base d'études de cas courants de réhabilitation de structures de génie civil utilisant ce type de composite, ainsi que d'études scientifiques concernant les TRC (Colombo et al., 2013).

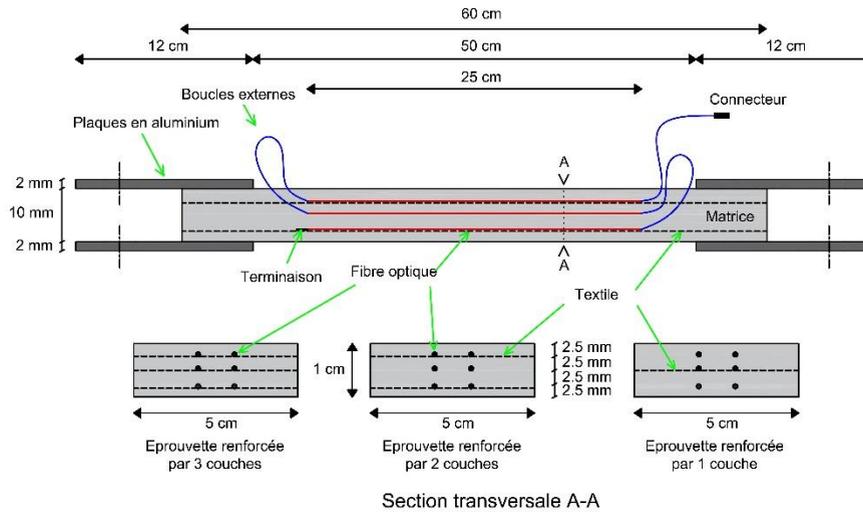


FIGURE 2. Schéma des éprouvettes TRC et les emplacements de la fibre optique

Pour ce faire, un moule a été préparé en superposant 4 plaques de plastique en chlorure de polyvinyle (PVC), chacune d'une épaisseur de 2 mm. Cette superposition a permis de placer et de centrer à la fois le renfort textile et la fibre optique dans les différentes positions. En effet, entre chaque deux plaques de PVC superposées, et en fonction du nombre de couches de renfort, soit une couche de renfort textile est positionnée, soit une ficelle à coudre tendue est placée le long du moule, à la position prévue des segments de la fibre optique qui seront noyée dans la matrice. Pour la mesure de la déformation du textile, les segments de la fibre optique ont été collés sur le textile par une colle cyanoacrylate. Pour la mesure de la déformation de la matrice, des segments de la fibre optique ont été attachés ponctuellement à la ficelle à coudre à l'aide de nœuds tous les 5 cm (Fig. 3).

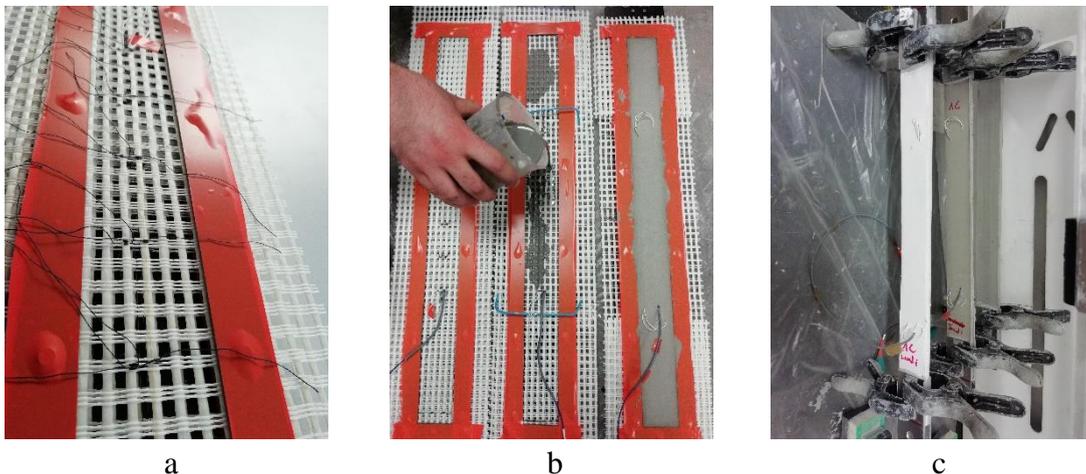


FIGURE 3. Étapes de préparation des éprouvettes TRC : (a) mise en place du textile et de la fibre optique ; (b) coulage de la matrice cimentaire ; (c) collage des plaques d'aluminium après démoulage

III. RESULTATS ET DISCUSSION

C. Longueur de transfert de charge

Pour ce travail, trois taux de renfort ont été étudiés : des TRC avec une, deux et trois couches de renfort, nommés TRC-1C, TRC-2C et TRC-3C, respectivement. La Fig. 4-a et b présentent la distribution de la déformation de la zone de mesure effective sur le TRC-1C au cours de la propagation des fissures. A l'apparition de la première fissure, la déformation du textile atteint sa valeur maximale à la position de cette fissure, tandis que dans la déformation de matrice est égale à zéro à cette position. Au voisinage de la fissure, la déformation de la matrice augmente progressivement de zéro jusqu'à devenir égale à sa valeur nominale en appliquant la loi des mélanges, tandis que celle du textile diminue progressivement jusqu'à ce qu'elle devienne presque égale à celle de la matrice. La distance entre la position de la fissure et le point où les déformations du textile et de la matrice deviennent constantes et égales représente la "longueur de transfert de charge", notée δ_0 (Fig. 4-a et b).

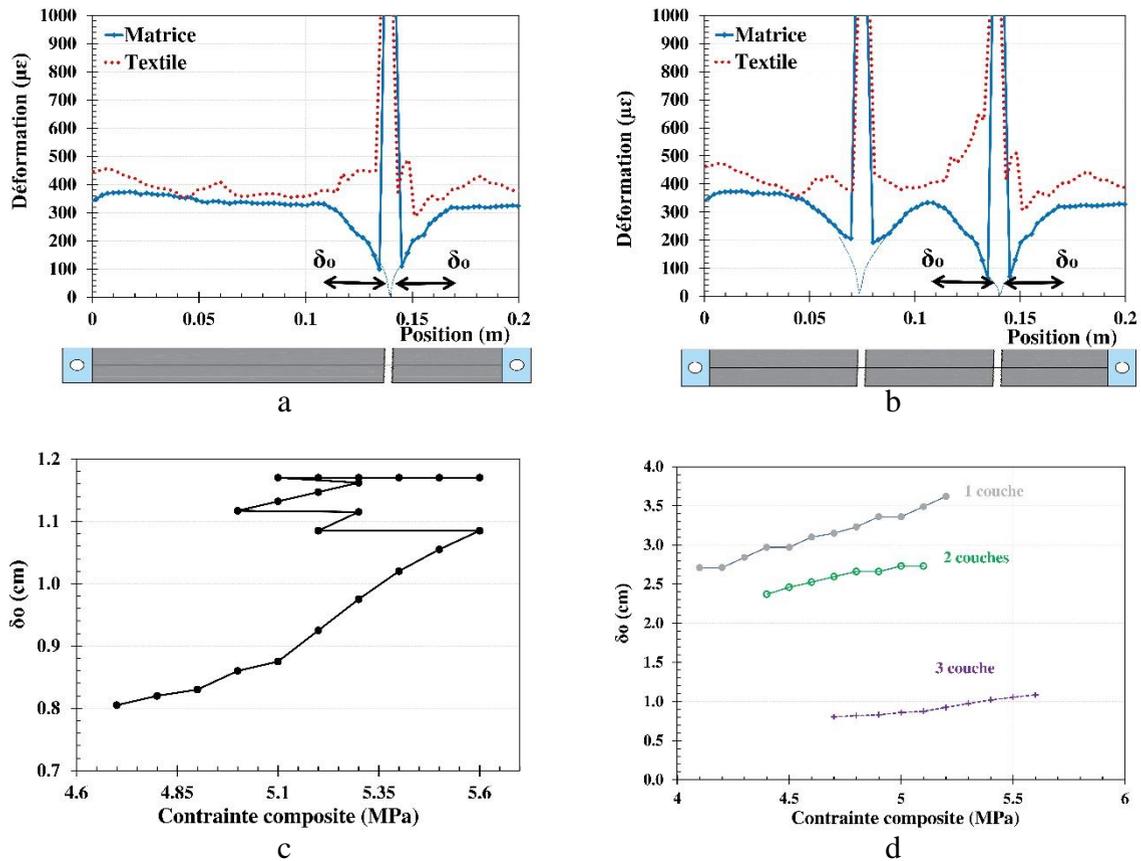


FIGURE 4. Résultats expérimentaux : distribution des déformations le long du TRC-1C au cours de la propagation des fissures (a) première fissure ; (b) deuxième fissure ; (c) évolution de δ_0 en fonction de la contrainte appliquée au composite pour le TRC-3L ; (d) évolution du premier segment de δ_0 pour les trois TRC testés

L'apparition d'une nouvelle fissure sur le TRC se produit en une position donnée lorsque la déformation ultime de la matrice dans cette position est atteinte. En observant les Fig.4-a et b, le long de la longueur δ_0 , la déformation de la matrice est plus faible par rapport au reste du TRC. Cela implique que, en augmentant la charge appliquée et sachant que la matrice a un comportement

élastique, la déformation ultime de la matrice sera atteinte dans la zone non-couverte par les δ_0 induites par les fissures qui ont apparues. Sur la base de cette analyse, l'espacement des fissures ne peut pas être inférieur à δ_0 . De même, tant qu'il y a une zone entre deux fissures là où les déformations du textile et de la matrice sont quasi-identiques, une nouvelle fissure aura lieu entre les deux existantes. De ce fait, l'espacement maximal entre fissure ne peut être supérieur à $2 \delta_0$, ce qui montre que ce paramètre contrôle le schéma de fissuration de la TRC.

En utilisant les capteurs à fibres optiques, une mesure précise des valeurs de δ_0 des TRC est possible. Pour ce faire, dès l'apparition de la première fissure, δ_0 est mesuré en prenant la moyenne des deux longueurs de transfert de charge développées de part et d'autre de la fissure étudiée. Ensuite, l'évolution de cette longueur est mesurée en fonction de la charge appliquée. Les résultats obtenus sont présentés sur la Fig.4-c.

À partir de la Fig.4-c, il peut être noté que δ_0 évolue quasi-linéairement dans un premier temps avec l'augmentation de la contrainte appliquée au composite. Ensuite, une fois qu'une nouvelle fissure apparaît, la contrainte appliquée chute, tandis que δ_0 reste quasi-constante et garde la valeur qu'elle avait juste avant cette nouvelle fissuration. Ce comportement est exprimé par les retours quasi-horizontaux observés sur l'évolution de δ_0 . Après cette chute de contrainte, δ_0 reprend son évolution quasi-linéaire avec l'augmentation de la charge appliquée, et ainsi de suite, en constituant plusieurs segments de δ_0 quasi-linéaires. À la suite d'un certain nombre de fissures, δ_0 devient constante et n'évolue plus pour le reste de l'essai, même si la contrainte appliquée poursuit son augmentation. Cela est dû au chevauchement des longueurs de transfert de charge des fissures adjacentes, qui a lieu quand la nouvelle fissure est apparue à une distance moins de $2 \delta_0$ par rapport à la fissure étudiée.

La Fig.4-d montre que δ_0 est fortement influencée par le taux de renfort. En effet, cette longueur diminue avec l'augmentation du nombre de couche de renfort. Cette constatation concorde avec l'espacement des fissures qui diminue avec l'augmentation des taux de renfort, ce qui valide le lien étroit entre cet espacement et la longueur de transfert de charge.

D. Contrainte de cisaillement à l'interface textile/matrice

A partir de la distribution de la déformation de la matrice le long du TRC, la contrainte de cisaillement à l'interface textile/matrice peut être déduite. En effet, la charge est transmise du textile à la matrice à travers l'interface. Il suffit donc de connaître la charge transmise du textile à la matrice pour chaque élément ' dx ', puis de la diviser par la surface latérale des fils longitudinaux du textile de longueur ' dx '. La charge transmise à la matrice est obtenue par sa déformation enregistrée par la fibre optique. Par conséquent, il suffit de calculer la charge dans la matrice pour chaque point de mesure par fibre optique, puis de calculer la différence de charge entre deux points successifs afin de déterminer la charge transmise à chaque longueur élémentaire ' dx '. Ces dernières prennent la valeur de la résolution spatiale de la fibre optique, qui est de 2.6 mm. Ensuite, cette charge est divisée par la surface latérale d'un fil textile de diamètre ' P_f ' et de longueur ' dx ', multipliée par le nombre de fils longitudinaux ' N_f '. Cette formule (1) est détaillée dans (Saidi and Gabor, 2020).

$$\tau(x) = (S_C \times E_m \times \Delta \varepsilon_m) / (dx \times N_f \times P_f) \quad (1)$$

Avec S_c la surface totale de la section transversale du TRC ($= 550 \text{ m}^2$), E_m le module d'Young de la matrice et $\Delta\varepsilon_m$ la différence de déformation entre deux points de mesure successifs dans la matrice.

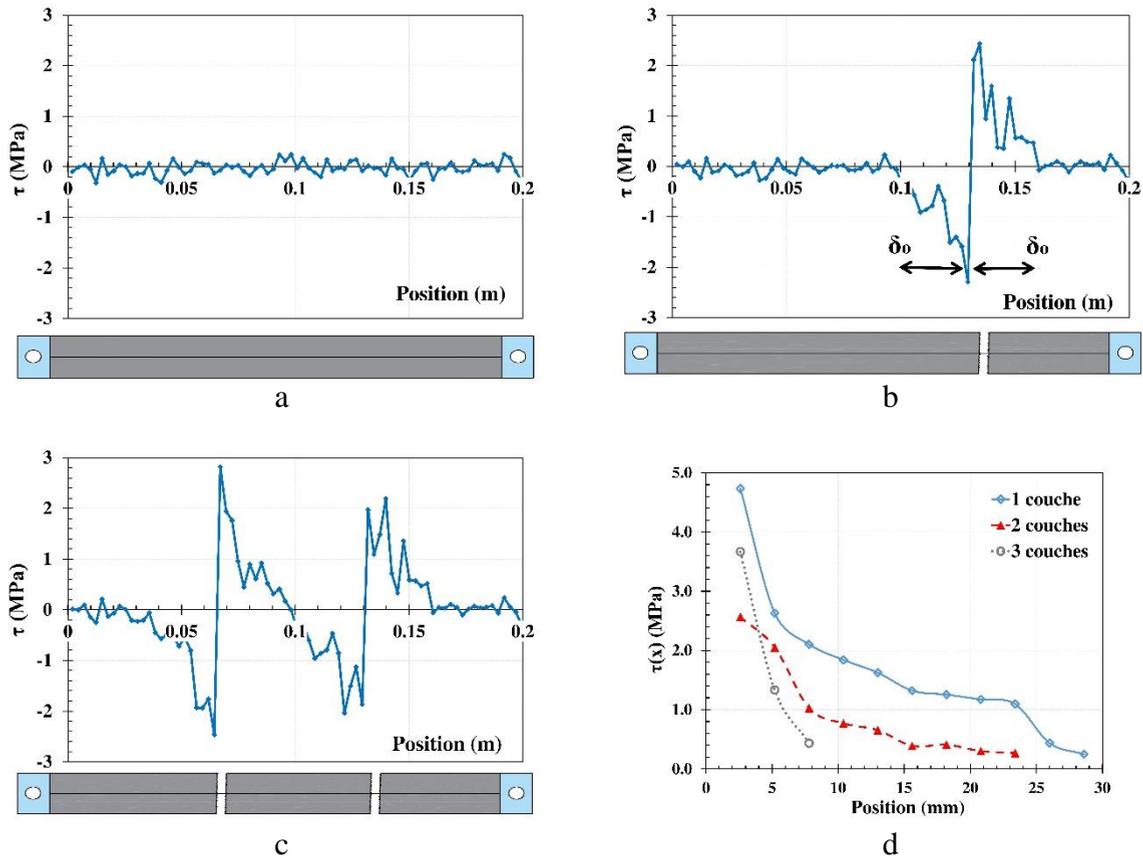


FIGURE 5. Résultats de la contrainte de cisaillement à l'interface textile/matrice : distribution le long du TRC-1C (a) avant fissuration ; (b) apparition de la première fissure ;(c) deuxième fissure ; (d) distribution de $\tau(x)$ le long de δ_0 pour les trois TRC testés

Les résultats expérimentaux de la contrainte de cisaillement à l'interface sont présentés sur la Fig.5. Ces résultats montrent que la distribution de $\tau(x)$ le long du TRC est étroitement liée à la fois au nombre des fissures et aux longueurs de transfert de charge δ_0 . En effet, cette contrainte atteint sa valeur maximale aux positions proches des fissures, puis elle diminue progressivement en parcourant les longueurs de transfert de charge jusqu'à ce qu'elle s'annule à δ_0 . Dans les zones non-couvertes par l'une des longueurs δ_0 , la contrainte $\tau(x)$ vaut zéro. L'emplacement des fissures présente un point d'antisymétrie de la distribution de $\tau(x)$ le long du δ_0 de part et d'autre de la fissure ($\tau(x)$ positif sur un côté de la fissure et négatif sur l'autre).

Le long de δ_0 , la contrainte $\tau(x)$ présente une évolution parabolique décroissante. Cette constatation expérimentale montre que, contrairement aux hypothèses de la littérature (Aveston and Kelly, 1973; Cuypers and Wastiels, 2006), la distribution des contraintes de cisaillement n'est pas constante le long de δ_0 . Par conséquent, un perfectionnement des modèles existants doit être envisagé.

IV. CONCLUSION

Ce papier présente et discute l'évolution de deux paramètres clés du comportement fissurant des TRC : la longueur de transfert de charge et la contrainte de cisaillement à l'interface textile/matrice. Cette étude expérimentale est réalisée en utilisant des capteurs à fibres optiques distribuées. Ces dernières ont permis d'obtenir la distribution de la déformation de la matrice et du textile avant, pendant et après fissuration des TRC, avec une résolution spatiale millimétrique.

En se basant sur les résultats expérimentaux, une mesure précise de la longueur de transfert a été effectuée. A la base d'un calcul d'équilibre mécanique en partant des résultats expérimentaux, la contrainte de cisaillement à l'interface textile/matrice a été déduite. Le rapport entre les longueurs de transfert de charge et l'espacement entre fissure a été mise en évidence. Le long de cette longueur, la contrainte de cisaillement varie paraboliquement le long de la longueur de transfert de charge et est égale à zéro au-delà de ces longueurs. Cette contrainte atteint sa valeur maximale au voisinage des fissures. Les positions de ces dernières constituent des points d'antisymétrie de la distribution de la contrainte de cisaillement de part et d'autre de chaque fissure.

Cette étude constitue une contribution à la compréhension des mécanismes de transfert de charge à l'interface textile/matrice des TRC. Ainsi, elle a mis en évidence les potentiels métrologiques de la fibre optique, qui peut être utilisée pour approfondir la compréhension du comportement mécanique des TRC.

REFERENCES

- Aveston, J., Kelly, A., 1973. Theory of multiple fracture of fibrous composites. *J. Mater. Sci.* 8, 352–362. <https://doi.org/10.1007/BF00550155>
- Caggegi, C., Sciuto, D., Cuomo, M., 2018. Experimental study on effective bond length of basalt textile reinforced mortar strengthening system: Contributions of digital image correlation. *Measurement* 129, 119–127. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2018.07.003>
- Colombo, I.G., Magri, A., Zani, G., Colombo, M., di Prisco, M., 2013. Erratum to: Textile Reinforced Concrete: experimental investigation on design parameters. *Mater. Struct.* 46, 1953–1971. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0023-7>
- Cuypers, H., Wastiels, J., 2006. Stochastic matrix-cracking model for textile reinforced cementitious composites under tensile loading. *Mater. Struct. Constr.* 39, 777–786. <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9053-0>
- Henault, J.-M., 2013. 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. Université Paris-Est-France.
- Saidi, M., Gabor, A., 2020. Experimental analysis and analytical modelling of the textile/matrix interface shear stress in textile reinforced cementitious matrix composites. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 135, 105961. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105961>
- Soller, B.J., Gifford, D.K., Wolfe, M.S., Froggatt, M.E., 2005. High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies. *Opt. Express* 13, 666. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.000666>