

# Analyse expérimentale du comportement en cisaillement de murs en maçonnerie de pierre calcaire renforcés par un composite à base de jute

Hyseni Alba<sup>1</sup>, Caggegi Carmelo<sup>2,3</sup>, Reboul Nadege<sup>2</sup>, Micelli Francesco<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Università del Salento, Department of Innovation Engineering, Lecce, Italy

<sup>2</sup>Université Claude Bernard University Lyon 1, Laboratory of Composite Materials for Construction (LMC2). Site Bohr, 82 Boulevard Niels Bohr, Campus de la DOUA, 69622 Villeurbanne Cedex, France

<sup>3</sup>Université Savoie Mont Blanc - Polytech, Laboratoire procédés énergie bâtiment (LOCIE), Bâtiment Helios, 60 rue du lac Léman, Savoie Technolac, 73370 Le Bourget-du-Lac, France.

## RESUME

Dans le cadre du renforcement des bâtiments historiques en maçonnerie, l'application de matériaux composites à matrice inorganique (TRM – Textile Reinforced Mortar) sur les surfaces des éléments à renforcer est considérée comme une des solutions les plus performantes et compatibles avec le support. Ce travail concerne l'analyse expérimentale des performances mécaniques de maçonneries en pierre calcaire renforcés avec un composite TRM caractérisé d'un textile en fibre de jute et une matrice à base de chaux. L'usage de la jute comme fibre de renfort est une piste de recherche pour le développement de solutions à faible impact environnemental. Dans la campagne expérimentale, le composite est appliqué sur les échantillons comme un enduit de façade. L'étude montre que le Jute-TRM permet d'augmenter la résistance au cisaillement (jusqu'à +57%) sans toutefois améliorer de façon importante la ductilité du système renforcé.

**Mots-clefs** Maçonnerie, Fibres végétales, Renforcement, Composites, Jute

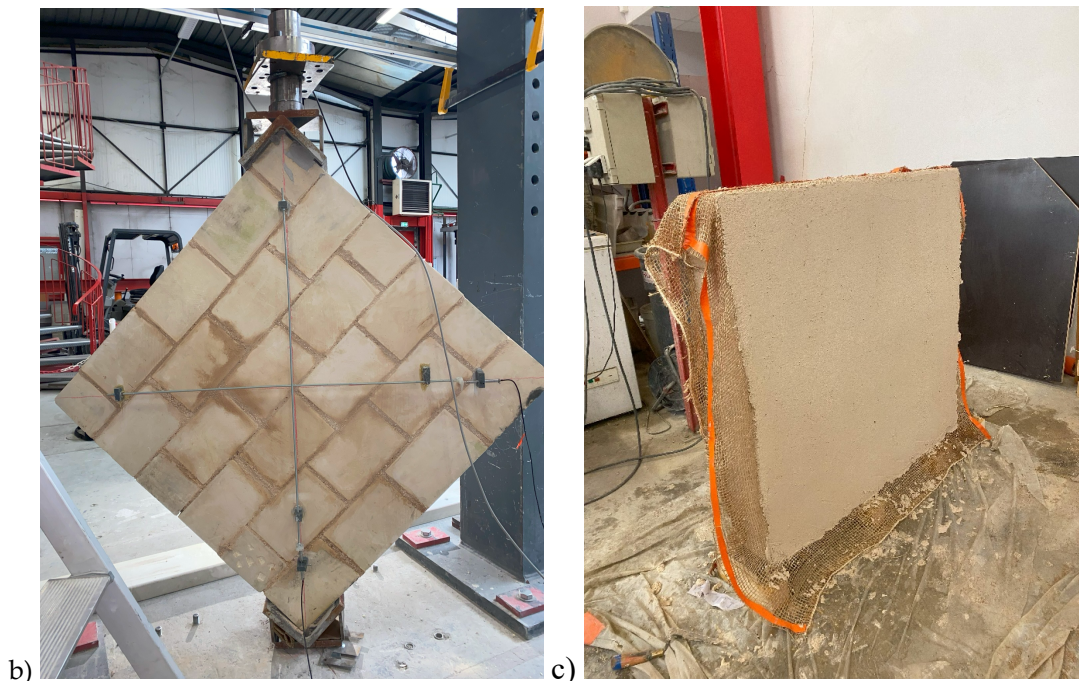
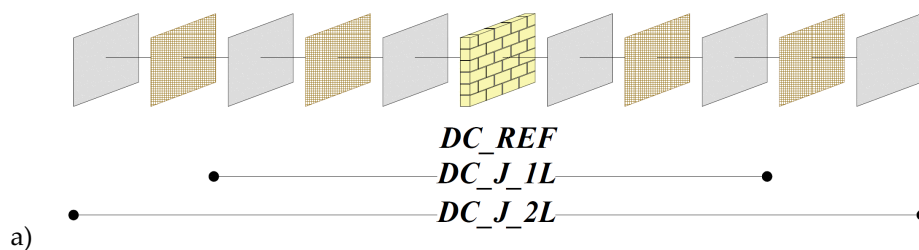
## I. INTRODUCTION

Les structures en maçonnerie du patrimoine culturel européen se montrent généralement vulnérables aux séismes en raison d'une faible résistance aux forces latérales, notamment au cisaillement (Anzani et al. 2018, Kaplan et al. 2010). Le renforcement par matériaux composites caractérisés d'une grille en textile noyée dans une matrice en mortier (Textile Reinforced Mortar - TRM) et appliqués sur les surfaces extérieures des éléments à renforcer offrent une alternative prometteuse aux méthodes de renfort traditionnelles (faible poids, facilité d'application, amélioration des performances mécaniques) grâce à leurs performances mécaniques (Caggegi et al. 2017, Ferrara et al. 2020, Trochoutsou et al. 2021, Ghiassi et al. 2016, De Felice et al. 2018). Cette étude explore avec une approche expérimentale l'utilisation de grilles en jute pour renforcer les structures historiques en maçonnerie (Hyseni et al., 2025) ; les fibres végétales en jute ont été choisies pour leur faible coût. La campagne expérimentale a été réalisée sur des murs en blocs de pierre calcaire de Lecce, ville italienne possédant un centre historique baroque avec des bâtiments en maçonnerie. Les murs en pierre calcaire (« pietra leccese »), renforcés avec des composites Jute-TRM, ont été testés sous compression diagonale au laboratoire LMC2. Les performances de

différentes configurations de renforcement (une ou deux couches de TRM) sont analysées et discutées dans l'article.

## II. PROGRAMME EXPERIMENTAL

Dans la campagne expérimentale, cinq murs de moyenne échelle ont été testés en compression diagonale pour évaluer les performances mécaniques du Jute-TRM (Figure 1a) : un sans renforcement (DC\_REF), deux avec un TRM caractérisé d'une couche de jute sur chaque face (DC\_J\_1L), et deux avec un TRM caractérisé de deux couches de jute sur chaque face (DC\_J\_2L). Le module de Young et la résistance à la traction de la jute ont été calculés par des essais de traction sur fil à partir de la courbe contrainte-déformation : leurs valeurs moyennes sont égales respectivement à 8000 MPa (E) et 345 MPa ( $\sigma_{\max}$ ). La matrice du composite est réalisée avec un mortier à base de chaux caractérisé d'une résistance moyenne à la compression de 9,65 MPa et une résistance moyenne à la flexion de 3,13 MPa.



**FIGURE 1.** a) Représentation des trois configurations de renforcement des murs de maçonnerie testés ; b) Configuration de l'essai (DC\_REF) ; c) Mur renforcé avec du Jute-TRM.

La taille des murs est de 1010 mm x 1030 mm x 150 mm. La résistance moyenne à compression des blocs est de 12,44 MPa (Co.V. 18%), la taille des blocs est de 150 mm x 162 mm x 245 mm et de 150 mm x 162 mm x 123 mm (Hyseni et al. 2025). le dispositif d'essai de compression diagonale est montré en Figure 1b. Le TRM à base de Jute a été appliqué sur les deux faces externes des murs (Figure 1c).

### III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats des essais de compression diagonale réalisés sur les murs DC\_REF, DC\_J\_1L, et DC\_J\_2L sont présentés en termes de charge appliquée et des déplacements verticaux et horizontaux dans la Figure 2. L'analyse des données enregistrées (charge et déplacements) a permis de calculer les contraintes et déformations de cisaillement selon deux approches : les directives ASTM (ASTM, 2013), qui concernent le cisaillement diagonal pour les maçonneries et les recommandations RILEM (RILEM T.76-LUM, 1994). Le Tableau 1 détaille les charges maximales, les contraintes de cisaillement maximales, les types de rupture ainsi que l'énergie élastique dissipée ( $\Gamma_{el}$ ) et l'énergie totale dissipée ( $\Gamma_{tot}$ ) pour chaque essai. Il inclut également un facteur de capacité d'amélioration, qui compare les performances des murs renforcés à celles du mur DC\_REF\_1. Tous les murs renforcés montrent une augmentation de la résistance maximale au cisaillement ; l'augmentation moyenne enregistrée est de +53% pour la série DC\_J\_1L et de +33% pour la série DC\_J\_2L. Le nombre de couches de textile ne semble pas affecter la résistance au cisaillement. La quasi-totalité des échantillons testés ne montrent pas une phase post-pic ; une fracture fragile par fissuration diagonale (Fig. 3a) a été enregistrée pour les échantillons renforcés DC\_J\_1L\_1, DC\_J\_1L\_2 et DC\_J\_2L\_2. L'unique échantillon qui montre une longue phase post-pic est le DC\_J\_2L\_1 ; la fracture de ce dernier est due à un glissement par cisaillement sur un joint ; ce mode de fracture est probablement lié à une imperfection du joint.

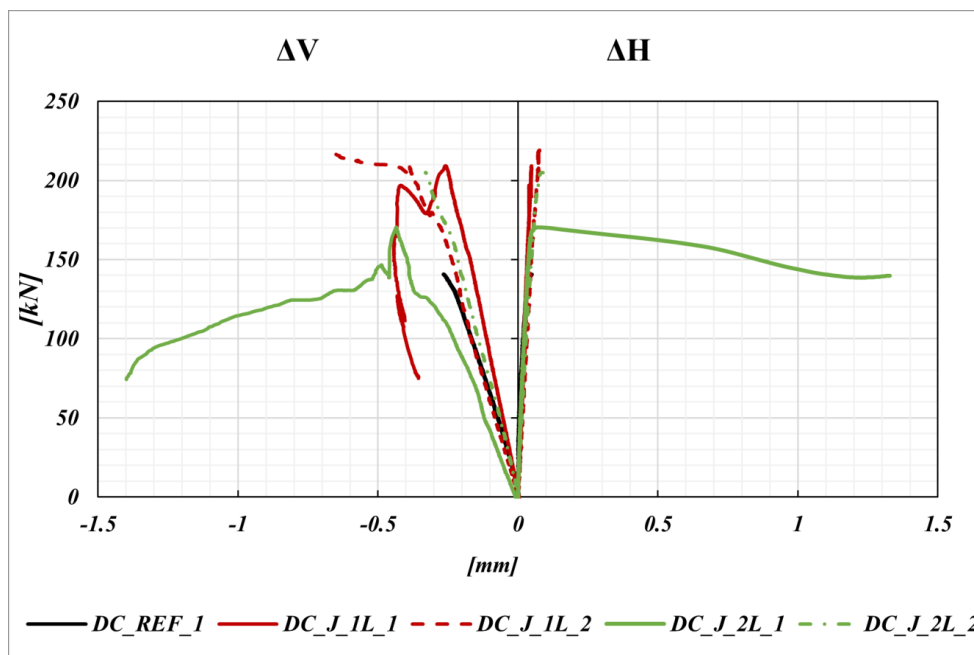
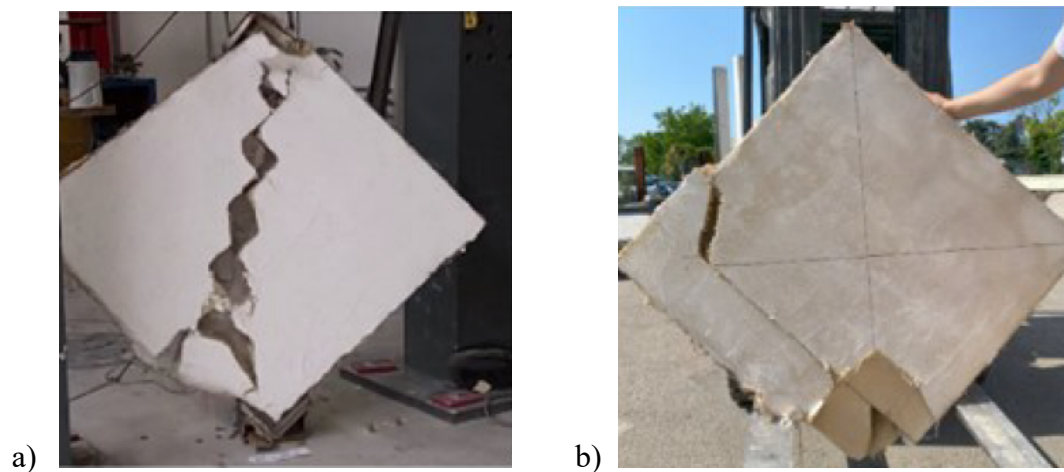


FIGURE 2. Courbes charge-déplacements verticaux/horizontaux des essais de compression diagonale des séries DC\_REF ; DC\_J\_1L ; DC\_J\_2L.

**TABLEAU 1.** Charge maximale ( $P_{\text{peak}}$ ), contrainte maximale de cisaillement selon ASTM ( $\tau_{0, \text{ASTM Peak}}$ ), contrainte maximale de cisaillement selon RILEM ( $\tau_{0, \text{RILEM Peak}}$ ), énergie élastique dissipée ( $\Gamma_{\text{el}}$ ), énergie totale dissipée ( $\Gamma_{\text{tot}}$ ), mode de rupture et facteur d'amélioration pour les essais de compression diagonale.

Echantillon	$P_{\text{peak}}$	$\tau_{0, \text{ASTM Peak}}$	$\tau_{0, \text{RILEM Peak}}$	$\Gamma_{\text{el}}$	$\Gamma_{\text{tot}}$	Mode de rupture	Facteur d'amélioration
[-]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[J]	[J]	[-]	[-]
DC_REF_1	140.69	0.65	0.49	2102.3	2323.7	Glissement par cisaillement et rupture diagonale	-
DC_J_1L_1	209.25	0.91	1.15	3499.4	8206.5	Détachement du renfort après fissuration de la maçonnerie	1.49
DC_J_1L_2	220.63	0.96	1.22	5557.0	6174.7	Rupture diagonale	1.57
DC_J_2L_1	170.44	0.70	0.88	2252.7	4895.6	Glissement par cisaillement	1.21
DC_J_2L_2	205.06	0.84	1.06	3212.9	3212.9	Rupture diagonale	1.46



**FIGURE 3.** Modes de rupture concernant les échantillons DC\_J\_1L\_2 (a) et DC\_J\_2L\_1 (b).

### III. CONCLUSIONS

Cette étude présente les résultats d'une campagne expérimentale visant à comprendre le comportement au cisaillement des murs de maçonnerie renforcés avec des systèmes composites Jute-TRM soumis à des forces de compression diagonale. L'application du Jute-TRM a permis une amélioration notable, augmentant la capacité de cisaillement, principalement grâce à la contribution de la matrice. Cependant, le textile de jute n'a pas amélioré la ductilité du système. Bien que ces résultats soient prometteurs, ils soulignent la nécessité de poursuivre la recherche pour optimiser les performances structurelles d'une telle solution. La modification du taux de renfort du composite peut apporter une amélioration du comportement ductile du système et mérite une attention particulière dans les perspectives de recherche. L'évaluation de la durabilité des composites (jute et Jute-TRM) reste essentielle. Des essais à long terme sont indispensables pour mieux comprendre les performances des composites à base de fibres naturelles pour développer des solutions durables et efficaces pour le renforcement de la maçonnerie.

### REFERENCES

- American Society for Testing and Materials, *Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages*, ASTM International (2003).
- Anzani, A., Cardani, G., Condoleo, P., Garavaglia, E., Saisi, A., Tedeschi, C., ... & Valluzzi, M. R. (2018). *Understanding of historical masonry for conservation approaches: the contribution of Prof. Luigia Binda to research advancement*. *Materials and Structures*, 51(6), 1-27.
- Caggegi, C., Lanoye, E., Djama, K., Bassil, A., & Gabor, A. (2017). *Tensile behaviour of a basalt TRM strengthening system: Influence of mortar and reinforcing textile ratios*. *Composites Part B: Engineering*, 130, 90-102.
- De Felice, G., Aiello, M. A., Caggegi, C., Ceroni, F., De Santis, S., Garbin, E., ... & Viskovic, A. (2018). *Recommendation of RILEM Technical Committee 250-CSM: Test method for Textile Reinforced Mortar to substrate bond characterization*. *Materials and Structures*, 51, 1-9.
- Ferrara, G., Caggegi, C., Martinelli, E., & Gabor, A. (2020). *Shear capacity of masonry walls externally strengthened using Flax-TRM composite systems: Experimental tests and comparative assessment*. *Construction and Building Materials*, 261, 120490.
- Ghiassi, B., Razavizadeh, A., Oliveira, D. V., Marques, V., & Lourenço, P. B. (2016). *Tensile and bond characterization of natural fibers embedded in inorganic matrices*. (pp. 305-314). Springer Netherlands.
- Hyseni, A., Caggegi, C., Reboul, N., Micelli, F. (2025). *Diagonal shear behaviour of limestone masonry walls strengthened with jute-TRM composites*, *Construction and building material*, Vol. 470, 140572.
- Kaplan, H., Bilgin, H., Yilmaz, S., Binici, H., & Öztas, A. (2010). *Structural damages of L'Aquila (Italy) earthquake*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(3), 499-507.
- Trochoutsou, N., Di Benedetti, M., Pilakoutas, K., & Guadagnini, M. (2021). *Mechanical characterisation of flax and jute textile-reinforced mortars*. *Construction and Building Materials*, 271, 121564.
- RILEM, T. 76-LUM (1994). *Diagonal tensile strength tests of small wall specimens*. Bagnex: International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures.