

# Effets de la pré-imprégnation et des fibres courtes de lin sur les composites FRCM végétaux : analyse du comportement mécanique par corrélation d'images numériques (CIN)

Oladikpo Gatien AGOSSOU, Omayma HOMORO, Sofiane AMZIANE

*Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France*

**RESUME** Les composites FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix) sont conçus pour renforcer des éléments structurels tels que le béton et la maçonnerie. Dans le contexte environnemental actuel, les FRCM végétaux à base de textiles végétaux comme le lin, le chanvre ou le jute représentent une alternative écologique aux FRCM synthétiques (à base des textiles de carbone, de verre, etc.). Cependant, le comportement mécanique et les mécanismes de fissuration des FRCM naturels sont complexes, influencés par les propriétés interfaciales entre le textile et la matrice. Cette complexité, associée à un manque de connaissances approfondies sur leur comportement mécanique, limite encore leur attractivité dans des applications réelles. Cet article a pour objectif d'approfondir la compréhension du comportement global et local en traction des composites FRCM végétaux, en utilisant la technique de corrélation d'images numériques (CIN). Deux types de textiles végétaux (le lin et le jute) et un textile synthétique (carbone), ont été choisis pour la mise en place des composites FRCM. L'étude vise à évaluer l'influence de plusieurs facteurs clés : les propriétés physiques et mécaniques des textiles, l'ajout de fibres courtes de lin dans la matrice minérale, la pré-imprégnation des textiles végétaux dans la matrice minérale, ainsi que le taux de renforcement (quantité du textile) sur les performances en traction des composites. Les résultats ont montré que les paramètres analysés ont un impact significatif sur la réponse mécanique des FRCM, en termes de courbe contrainte-déformation, de propriétés en traction, de l'espacement entre les fissures, de la largeur des fissures et de leur évolution pendant le chargement, du mode de rupture ainsi que du taux d'exploitation du textile dans le composite (facteur d'efficacité, important pour les applications structurelles).

**Mots-clés :** FRCM végétaux, comportement mécanique, fibres courtes de lin, pré-imprégnation, CIN (Corrélation d'Images Numériques)

## I. INTRODUCTION

Depuis plusieurs décennies, les ouvrages de génie civil sont généralement caractérisés par leur vieillissement et leur vulnérabilité. La fragilité des structures en maçonnerie ou en béton, notamment due aux dommages importants causés lors d'événements sismiques (Ceci et al., 2010), (Indirli et al., 2013a), (Penna et al., 2014), (Indirli et al., 2013b; Kaplan et al., 2010) suscite une préoccupation particulière pour les ingénieurs et les acteurs de la construction. Ces structures nécessitent des solutions de renforcement et de réhabilitation appropriées pour garantir leur intégrité structurelle et la sécurité de leurs occupants. Pour répondre à ces défis et améliorer le comportement mécanique des structures, le développement de matériaux composites pour les systèmes de renforcement a suscité un vif intérêt au sein de la communauté scientifique. Parmi ces systèmes de renforcement, les polymères renforcés de

fibres (PRF) ont été largement utilisés comme première méthode d'application externe pour le renforcement des structures. Les PRF présentent plusieurs avantages, tels qu'une bonne résistance à la traction, une résistance à la corrosion, ainsi que des caractéristiques d'application faciles et rapides (Ascione et al., 2005; Triantafillou, 1998), (Valluzzi et al., 2002), (Marcari et al., 2007), (Prota et al., 2008), (Hollaway, 2010), (Caporale et al., 2013). Cependant, il est important de noter certains inconvénients associés aux systèmes de renforcement par PRF : l'utilisation de résines époxy (coût élevé, impact environnemental significatif, risques pour la santé), une compatibilité limitée avec certains substrats, en particulier la maçonnerie, une faible adhérence sur les surfaces humides, une perméabilité insuffisante à la vapeur qui peut entraîner des problèmes de condensation, et une performance médiocre à des températures élevées (Hollaway and Cadei, 2002).

Pour remédier aux limites mentionnées précédemment dans l'utilisation des PRF, l'utilisation de matrices minérales a été proposée en remplacement des matrices organiques (résine époxy), dans le but de favoriser une liaison efficace entre le composite de renforcement et le substrat (Papanicolaou et al., 2007), (Papanicolaou et al., 2008), (Papanicolaou et al., 2011). De nouveaux composites à base de matrices minérales et de textiles ont été développés et sont connus sous plusieurs noms, tels que Textile Reinforced Concrete (TRC), Textile Reinforced Mortar (TRM) ou encore Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM). L'utilisation des composites FRCM a connu une expansion ces dernières années en raison de leur bonne résistance au feu par rapport aux FRP, de leurs bonnes performances mécaniques, de leur perméabilité à la vapeur, de la réversibilité de l'intervention sur les substrats et représente aujourd'hui l'une des solutions efficaces pour le renforcement et la réhabilitation des ouvrages du génie civil (maçonnerie et béton). Le comportement mécanique des composites FRCM, notamment les propriétés de traction du FRCM et l'adhérence des textiles à la matrice minérale, a été étudié par plusieurs chercheurs (Agossou et al., 2024), (Ferrara et al., 2021), (Trochoutsou et al., 2021), (De Santis et al., 2017a), (Cevallos and Olivito, 2015), (de Felice et al., 2016), (Carozzi et al., 2017), (Caggegi et al., 2017), (Leone et al., 2017), (Akhoundi et al., 2018), (de Felice et al., 2018). Les textiles à haute résistance les plus utilisés dans les composites FRCM pour les systèmes de renforcement sont le polyparaphénylène benzobisoxazole (PBO), le carbone, l'acier, le verre, le basalte, l'aramide, etc., (Carozzi et al., 2017), (Caggegi et al., 2017), (De Santis et al., 2017b), (Saidi and Gabor, 2020), (Lignola et al., 2017), (Ferrara et al., 2019), (Junaid et al., 2024). Ces dernières années, les objectifs de construction durable et de transition écologique ont suscité un intérêt croissant pour l'utilisation de matériaux biodégradables, tels que les fibres végétales (comme le chanvre, le lin, le jute, le sisal, etc.), dans le développement de matériaux innovants et de solutions technologiques pour le secteur de la construction (Rousakis, 2017), (Agossou et al., 2025). L'utilisation de fibres végétales dans les matériaux composites, en remplacement des fibres synthétiques (telles que le verre, le carbone, l'aramide, etc.), permet de réduire ou d'éliminer plusieurs problèmes liés à la faible recyclabilité et à la consommation énergétique lors de la production de fibres synthétiques (Lebrun et al., 2013), (Placet et al., 2012), (Coroller et al., 2013). De plus, l'utilisation de fibres végétales dans les matrices minérales a montré une bonne liaison entre les fibres et la matrice minérale, par rapport aux fibres synthétiques (Cevallos and Olivito, 2015), (Mercedes et al., 2018), (Agossou and Amziane, 2023). Certaines études (Agossou et al., 2024), (Ferrara et al., 2021), (Trochoutsou et al., 2021), (Cevallos and Olivito, 2015), (Mercedes et al., 2020), (de Carvalho Bello et al., 2019), (Bardouh et al., 2024) ont été menées pour comprendre le comportement mécanique des composites FRCM végétaux fabriqués à partir de différents textiles tels que le jute, le lin et le chanvre.

Bien que de nombreuses recherches aient été menées sur les composites FRCM, le mécanisme de transfert de charges entre la matrice et le textile reste mal compris. Le taux de renforcement critique, nécessaire pour atteindre les performances mécaniques souhaitées, est encore en cours de recherche et dépend de plusieurs paramètres, tels que les propriétés physiques des textiles, ainsi que la composition et l'épaisseur de la matrice. Cette étude expérimentale examine la réponse en traction des composites FRCM végétaux en tenant compte de quatre paramètres clés afin d'élargir la compréhension de leur comportement mécanique. Tout d'abord, les propriétés physiques et mécaniques des textiles ont été évaluées en utilisant le lin, le jute et le carbone comme référence. Ensuite, le taux de renforcement du textile a été étudié en utilisant deux configurations de composites FRCM comprenant une ou deux

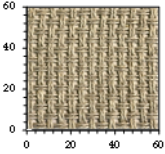
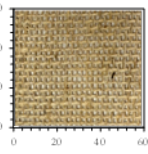
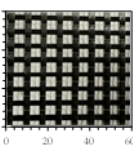
couches de textile. De plus, un traitement de préimprégnation des textiles végétaux dans la matrice minérale a été effectué pour améliorer l'adhérence entre les composants du composite. Enfin, l'impact des fibres courtes de lin dans la matrice sur le mécanisme de fissuration et la chute de charge à l'apparition des fissures a été analysé. La corrélation d'images numériques (CIN) a été utilisée pour étudier le comportement mécanique des matériaux à différentes échelles, tant au niveau local (localisation, nombre, ouverture et espacement des fissures) qu'au niveau global (courbe contrainte-déformation).

## II. Matériaux et méthodes

### A. Matériaux


Les composites FRCM de cette campagne expérimentale ont été élaborés en utilisant des textiles bidirectionnels en lin, jute et carbone, associés à une matrice minérale dénommée Ciment Naturel Prompt (CNP). Les propriétés physiques des textiles sont détaillées dans le **Tableau 1**. Des fibres courtes de lin d'une longueur de 6 mm ont été incorporées à la matrice avec une fraction volumique de 0.5 % dans le cadre de cette étude. La longueur et la fraction volumique spécifiques des fibres ont été choisies de manière à garantir une homogénéité du mélange au sein de la matrice. Les principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres courtes de lin utilisées sont récapitulées dans le **Tableau 2**.

**Tableau 1. Caractéristiques des textiles**

			
	<i>Lin</i>	<i>Jute</i>	<i>Carbone</i>
Taille des mailles [mm x mm]	3x3	3.1x3.3	5x5
Poids surfacique [g/m <sup>2</sup> ]	300*/328	222	320*/330
Densité linéaire [Tex]	324*	326*	-
Densité apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	1.50*	1.6*	-
Diamètre/épaisseur équivalente [mm]	0.525	0.507	0.052
Section transversale du fil [mm <sup>2</sup> ]	0.216	0.202	0.625
Nombre de fils/cm dans la section longitudinale	4.30	3.50	1.33
Nombre de fils/cm dans la section transversale	4.30	2.70	1.33

\* Caractéristiques fournies par le fabricant

**Tableau 2. Propriétés mécaniques des fibres courtes de lin (Agossou et al., 2024)**

	Longueur [mm]	Diamètre [μm]	Résistance en traction [MPa]	Module de Young [GPa]	Déformation à la rupture [%]
Moyenne	6	14.64	1250	64.81.78	1.78
Co.V [%]	-	20	14	22.8	8

Les propriétés mécaniques des textiles ont été déterminées à l'aide d'essai de traction directe (Standards, n.d.), réalisés sur des bandes de textile de 500 mm de longueur et 60 mm de largeur. Chaque bande comprenait respectivement 26, 24 et 8 fils pour les textiles de lin, de jute et de carbone. L'essai de traction (**Figure 1**) a été effectué à l'aide d'une presse électromécanique Zwick/Roell d'une capacité de 50 kN, fonctionnant en mode de contrôle de déplacement à une vitesse de 3 mm/min. Les propriétés mécaniques des textiles sont présentées en détail dans le **Tableau 3**.

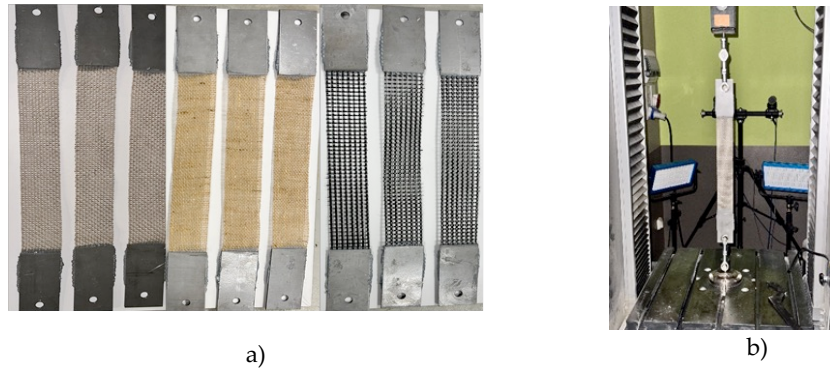


Figure 1. Caractérisation mécanique des textile: a) Bandes de textile b) Test de traction

Tableau 3. Propriétés de traction des différents textiles

Textile	$\sigma_{\text{text,max}}$		$\varepsilon_{\text{text,max}}$		$E_{\text{text}}$	
	[MPa]	Co.V [%]	[%]	Co.V [%]	[GPa]	Co.V [%]
Lin	265.15	4.52	2.89	6.65	14.22	5.47
Jute	187.50	3.48	1.67	6.51	15.14	11.55
Carbone	1775	2.47	2.90	7.78	96.1	4.68

$\sigma_{\text{text,max}}$ : Résistance du textile  
 $\varepsilon_{\text{text,max}}$ : Déformation maximale  
 $E_{\text{text}}$ : Rigidité du textile

La matrice minérale ordinaire (MO) et la matrice minérale renforcée de fibres courtes de lin (MR) ont été préparées respectivement avec un rapport eau/CNP de 0.5 et 0.7, puis coulée dans des moules de dimensions  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ . Les performances mécaniques ont été évaluées après 28 jours de durcissement, conformément à la norme EN 196-1 (Standards, n.d.). Les résistances moyennes à la compression et à la flexion sont résumées dans le [Tableau 4](#).

Tableau 4. Propriétés mécaniques des matrices

Propriétés	Symbole	MO		MR	
		Moyenne	Co.V [%]	Moyenne	Co.V [%]
Résistance en flexion [MPa]	$\sigma_f$	2.30	5.36	3.51	7.30
Résistance en compression [MPa]	$\sigma_c$	8.64	6.40	6.50	5.25

### B. Préparation des éprouvettes

La mise au point et la procédure de cure des composites FRCM exercent une influence significative sur leur réponse mécanique. Par conséquent, des dispositions et précautions particulières sont nécessaires pour optimiser les performances mécaniques attendues. Le choix des dimensions ainsi que la procédure de mise en œuvre des différents composites FRCM ont été faits conformément aux recommandations de la RILEM (RILEM Technical Committee 232-TDT (Wolfgang Brameshuber), 2016) et aux travaux antérieurs sur les composites FRCM (Ferrara et al., 2021), (Trochoutsou et al., 2021), (Cevallos and Olivito, 2015), (De Santis et al., 2017b), (Saidi and Gabor, 2020), (Lignola et al., 2017), (Junaid et al., 2024), (Lebrun et al., 2013), (Coroller et al., 2013), (Codispoti et al., 2015).

Toutes les éprouvettes mesuraient  $500 \times 60 \times 10 \text{ mm}^3$  ( [Figure 2](#)). Elles ont été fabriquées individuellement ([Figure 3](#)) avec une ou deux couches de textile. La configuration géométrique des éprouvettes est schématisée sur la [Figure 2](#). Les textiles ont été découpés de manière que le nombre de fils dans la section transversale soit uniforme pour toutes les éprouvettes, soit respectivement 26, 21 et 8 fils pour les textiles de lin, de jute et de carbone.

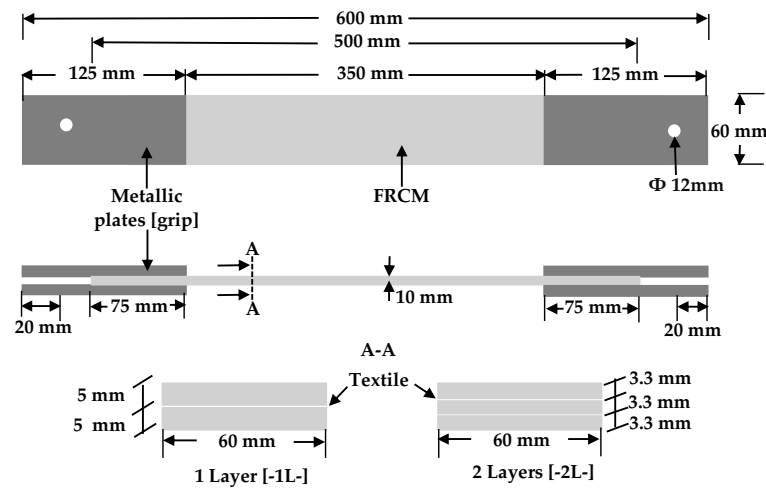


Figure 2. Schéma représentatif des composites FRCM

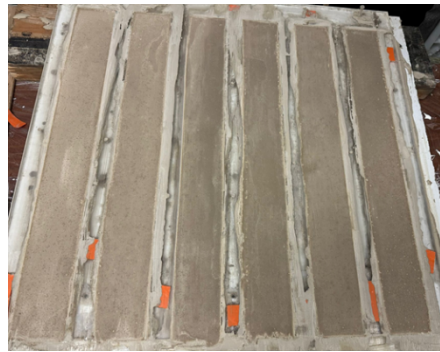


Figure 3. Préparation des éprouvettes

La pré-imprégnation des textiles de jute et de lin dans la matrice minérale s'est déroulée en cinq étapes :

- Un film de polyuréthane est placé sur une table ;
- Une première couche de matrice minérale formulée a été appliquée (soit la matrice minérale ordinaire (MO), soit la matrice minérale renforcée par des fibres courtes de lin (MR)) ;
- Le textile végétal est placé sur la couche de matrice minérale ;
- Une deuxième couche de matrice minérale a été appliquée sur le textile ;
- Une pression manuelle a été appliquée à travers le film de polyuréthane des deux côtés du textile afin de s'assurer que la matrice pénètre complètement dans les filaments du textile.

Après ce processus de pré-imprégnation, le textile pré-imprégné a été placé dans le moule. Les effets des fibres courtes de lin, de la préimprégnation du textile végétal dans la matrice minérale, des propriétés physiques et mécaniques du textile ainsi que du taux de renforcement ont été évalués, ce qui a conduit à la fabrication de 27 éprouvettes, réparties comme suit :

- **9 éprouvettes avec une couche (1L) de textile sans modification**, à raison de 3 éprouvettes par type de textile :
  - ✓ Lin (FL) : FRCM.1L.FL
  - ✓ Jute (J) : FRCM.1L.J
  - ✓ Carbone (C) : FRCM.1L.C
- **6 éprouvettes avec du textile de jute (J) et de fibres courtes de lin (F) ajoutées à la matrice**, à raison de 3 éprouvettes par nombre de couche de textile :

- ✓ FRCM.1L.J.F
- ✓ FRCM.2L.J.F
- **9 éprouvettes avec deux couches (2L) de textile sans modification**, à raison de 3 éprouvettes par type de textile :
  - ✓ FRCM.2L.FL
  - ✓ FRCM.2L.J
  - ✓ FRCM.2L.C
- **3 éprouvettes avec deux couches de textile de lin (FL) pré-imprégné (I)** :
  - ✓ FRCM.2L.FL.I

### C. Test de traction

Avant les essais, des plaques métalliques ont été collées aux extrémités des composites FRCM, sur une longueur de 125 mm. Cette préparation visait à faciliter leur fixation dans les mors de la machine d'essai et à garantir un transfert de charge uniforme et efficace, réduisant ainsi les risques de glissement ou de concentration locale de contraintes.

Les essais de traction directe (Figure 4) ont été réalisés à l'aide d'une presse électromécanique Zwick/Roell, dotée d'une capacité de 50 kN. Les essais ont été conduits sous contrôle de déplacement, avec une vitesse d'application de charge de 0.3 mm/min, afin d'assurer une acquisition précise des données mécaniques et d'éviter tout effet dynamique.

Un dispositif de corrélation d'images numériques (CIN) en 3D a été utilisé pour mesurer les champs de déplacement et les déformations sur les surfaces des éprouvettes. Cette technique permet une analyse détaillée des mécanismes de fissuration et des phénomènes locaux à l'échelle de la microstructure. Les paramètres optiques, tels que la résolution spatiale et la fréquence d'acquisition, ont été optimisés pour capturer les variations fines de déplacement pendant les essais.

Les détails méthodologiques complets ainsi que les résultats approfondis de ces analyses sont disponibles dans notre précédente publication (Agossou et al., 2024), offrant une perspective complémentaire sur le comportement des composites FRCM étudiés.

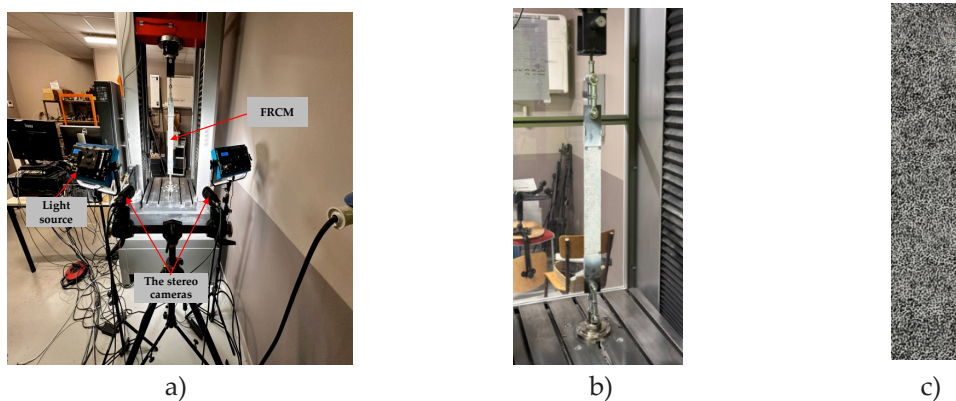


Figure 4. Dispositif d'essai de traction pour les composites FRCM : a) Vue d'ensemble b) Zoom du dispositif FRCM et c) Surface mouchetée pour CIN (Agossou et al., 2024)

## III. RESULTATS DE DISCUSSION

Le comportement à la traction des différents composites FRCM (Flax-FRCM, Jute-FRCM et Carbon-FRCM) est présenté sur la (Figure 5) à travers des courbes de contraintes-déformations. Les contraintes sont calculées comme le rapport entre la force appliquée et la section transversale du composite ( $60 \times 10 \text{ mm}^2$ ), tandis que les déformations sont déterminées en utilisant les déplacements longitudinaux extraits de l'analyse de la CIN sur une longueur de jauge de 350 mm. Les résultats principaux de ces tests sont résumés dans le **Tableau 5**, fournissant des informations cruciales sur le comportement mécanique de chaque type de composite sous sollicitation de traction.

L'analyse de la CIN a fourni des informations précieuses sur le comportement des fissures au cours de l'essai de traction, en permettant de localiser précisément leur position sur l'éprouvette, ainsi que d'enregistrer la charge à laquelle chaque fissure se forme et la déformation associée. De plus, cette analyse a permis de déterminer le nombre total de fissures, leur espacement, leur largeur, ainsi que leur évolution sous charge. La [Figure 6](#) présente un exemple représentatif de cette analyse appliquée aux éprouvettes Jute-FRCM. Chaque saut de pas sur la courbe correspond à l'apparition d'une fissure, tandis que la distance entre les sauts reflète l'espacement entre les fissures. Enfin, la différence de déplacement observée aux extrémités de chaque saut permet de déterminer la largeur de chaque fissure, fournissant ainsi une compréhension détaillée du mécanisme de fissuration et de la propagation des fissures dans les composites FRCM sous sollicitation. Plus de détails concernant ces résultats et l'analyse complète du comportement à la traction des composites FRCM sont fournis dans notre précédente publication (Agossou et al., 2024).

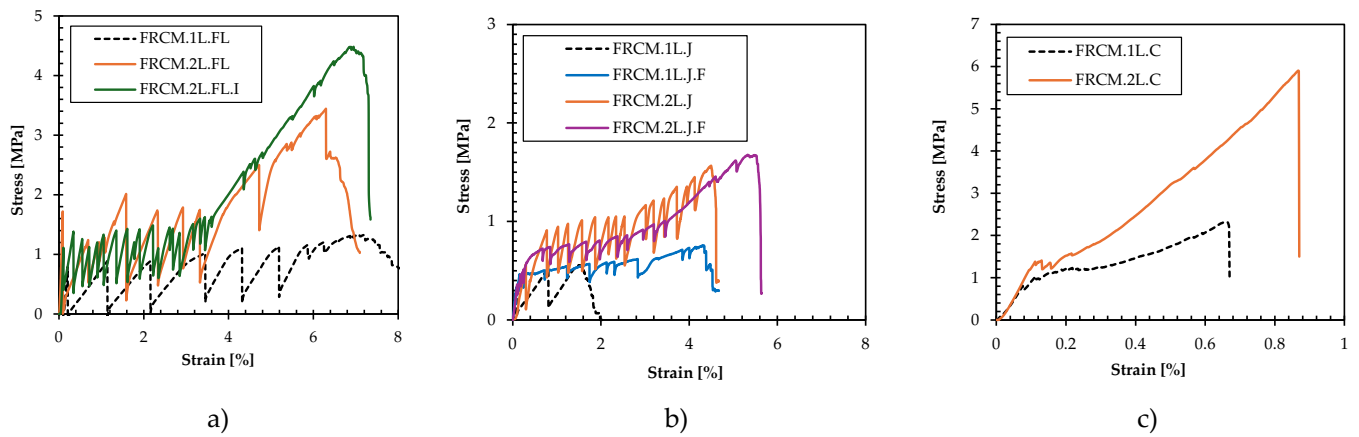


Figure 5. Courbes contrainte-déformation montrant la réponse à la traction des composites FRCM : a) lin-FRCM b) jute-FRCM c) carbone-FRCM

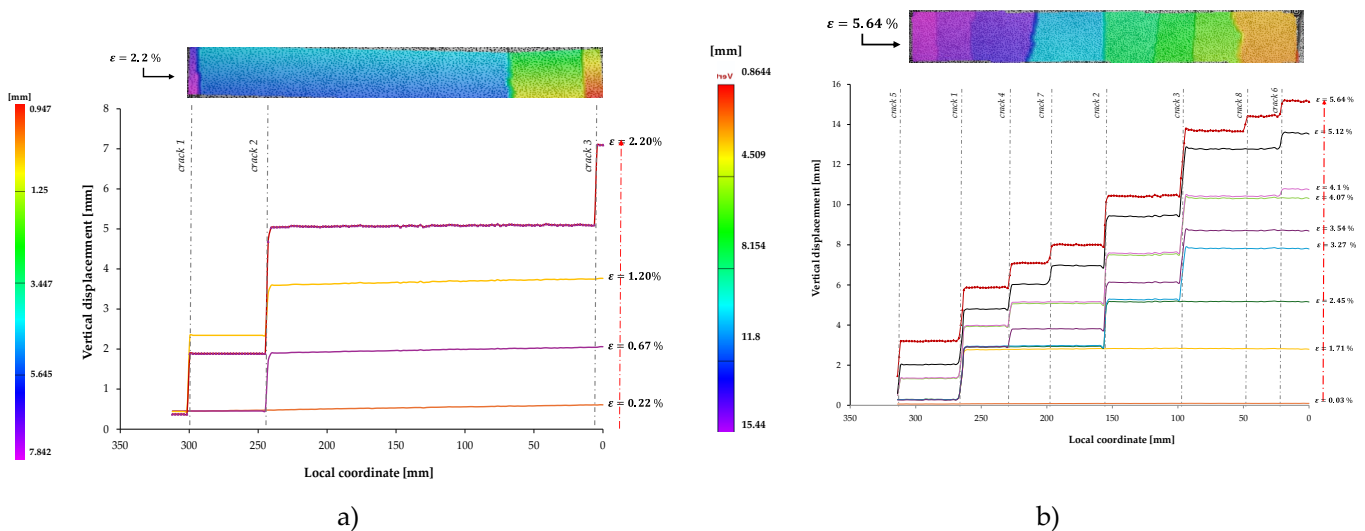


Figure 6. Mécanisme de fissuration des composites Jute-FRCM composites: a) FRCM.1L.J b) FRCM.1L.J.F

Tableau 5. Propriétés mécaniques des composites FRCCM

FRCCM-ID	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\epsilon_{max}$ [%]	$E_3$ [MPa]	$\sigma_1$ [MPa]	$\epsilon_1$ [%]	$E_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\epsilon_2$ [%]	$E_2$ [MPa]	$\mu$ [%]	N	W [mm]	S [mm]	
Lin-FRCM	FRCCM.1L.FL	1.25	6.97	-	0.74	0.10	736.29	1.35	6.97	8.82	50.18	6	6.72	54.21
	Co.V [%]	1.12	1.22	-	1.35	0.50	0.85	1.12	1.22	2.07	1.12	7.69	2.76	4.44
	FRCCM.2L.FL	3.52	6.31	86.97	0.96	0.10	956.06	1.67	3.53	20.67	70.51	8	2.69	42.32
	Co.V [%]	2.42	0.08	0.39	4.17	1.69	2.47	1.80	3.4	4.85	2.42	5.88	14.50	4.24
	FRCCM.2L.FL.I	4.43	6.83	88.85	1.02	0.09	1084.29	1.78	3.3	23.81	88.80	16	1.16	19.72
	Co.V [%]	2.20	1.50	1.61	6.04	4.42	3.52	4.96	6.36	0.87	2.20	2.88	8.56	5.91
Jute-FRCM	FRCCM.1L.J	0.48	1.77	-	0.42	0.09	468.75	0.48	1.77	3.91	36.45	3	1.87	145.20
	Co.V [%]	6.25	3.68	-	3.61	11.11	14.67	6.25	3.68	26.16	6.25	0	8.56	1.15
	FRCCM.1L.J.F	0.58	4.11	-	0.37	0.12	320.45	0.58	4.11	5.17	44.04	8	1.28	39.09
	Co.V [%]	2.82	6.18	-	5.50	4.04	6.36	2.82	6.18	4.15	2.82	5.90	4.88	6.72
	FRCCM.2L.J	1.42	4.11	-	0.74	0.10	777.56	1.42	4.11	16.79	53.78	12	1.22	28.66
	Co.V [%]	7.74	6.71	-	6.10	9.24	8.34	7.74	6.71	14.74	7.74	0	7.79	2.29
Carbone-FRCM	FRCCM.2L.J.F	1.62	5.13	33.80	0.60	0.09	641.09	0.97	2.87	13.43	68.79	13	0.97	21.86
	Co.V [%]	2.16	0.10	4.88	6.70	3.23	3.52	3.10	3.66	1.39	2.16	3.62	3.86	7.12
	FRCCM.1L.C	1.69	0.63	251.63	0.81	0.07	1000.98	1.03	0.36	78.41	11.45	11	0.33	29.13
	Co.V [%]	8.25	2.98	1.83	2.11	8.18	5.65	4.05	12.38	7.56	8.25	4.16	14.35	5.49
	FRCCM.2L.C	3.80	0.54	784.44	1.30	0.13	1127.56	1.52	0.2	278.77	12.89	16	0.20	21.37
	Co.V [%]	3.58	5.76	0.61	0.96	6.28	8.01	2.84	2.2	8.67	3.58	3	6.34	8.17

$\sigma_{max}$  : Maximum stress ,  $\epsilon_{max}$  : Maximum strain,  $E_3$  : Stiffness of phase III,  $\sigma_1$  : Stress corresponding to the appearance of the first crack,  $\epsilon_1$  : Strain corresponding to the appearance of the first crack,  $E_1$  : Stiffness of phase I,  $\sigma_2$  : Stress corresponding to the end of the cracking phase (phase II),  $\epsilon_2$  : Strain corresponding to the end of the cracking phase (phase II),  $E_2$  : Stiffness of phase II,  $\mu$  [%] : Textile exploitation rate, N : Average number of cracks, W : Average crack width at  $\sigma_{max}$ , S : Average crack spacing at  $\sigma_{max}$ .

#### A. Influence du type de textile

Les propriétés physiques et mécaniques des textiles jouent un rôle fondamental dans la performance des composites FRCCM. Les textiles en carbone, lin et jute présentent des caractéristiques distinctes influençant leur adhérence à la matrice, leur taux d'exploitation et leur comportement mécanique global, comme expliqué dans la section 3.1. Les textiles en carbone, bien que dotés d'une résistance et d'une rigidité élevées ( $\sigma_{text,max} = 1775$  MPa,  $E_{text} = 96$  GPa), ont montré une faible capacité de déformabilité et souffrent d'une adhérence limitée à la matrice en raison de leur surface lisse et de leur imprégnation préalable à la résine, ce qui réduit leur taux d'exploitation à seulement 13 % pour le FRCCM.2L.C avec des délaminations précoces. À l'inverse, les textiles en lin et en jute, avec une structure rugueuse et une meilleure pénétrabilité de la matrice, offrent une exploitation supérieure, atteignant jusqu'à 70 % pour le FRCCM.2L.FL, contre 53 % pour le FRCCM.2L.J. Le taux d'exploitation des textiles en carbone est inférieur à celui des textiles végétaux, principalement en raison de leur très grande résistance à la traction. En effet, la force nécessaire pour rompre un textile en carbone dépasse souvent la capacité de liaison de l'interface textile-matrice, ce qui peut conduire à une adhésion inadéquate (Focacci et al., 2020), (Focacci et al., 2022). Le textile de lin, avec une densité de fils élevée (4.3/cm contre 3.5/cm pour le jute et 1.33/cm pour le carbone), favorise une répartition homogène des contraintes, ce qui confirme l'analyse faite sur la réponse mécanique de l'interface textile-matrice. En termes d'applications, les textiles en carbone conviennent mieux au renforcement de structures rigides et à haute résistance, comme les poutres ou poteaux, tandis que les textiles en lin et en jute sont mieux adaptés aux substrats plus souples, tels que la maçonnerie, où une grande déformabilité et une bonne dissipation d'énergie sont nécessaires. Ainsi, le choix du textile doit être guidé par les exigences spécifiques de l'application visée.

#### B. Influence de la pré-imprégnation

La pré-imprégnation des textiles dans une matrice minérale est une technique peu courante visant à améliorer les propriétés mécaniques des composites FRCCM, bien qu'elle présente des avantages notables pour les textiles végétaux comme le lin et le jute. Dans cette étude, la pré-imprégnation a permis d'améliorer les propriétés mécaniques pour des composites à deux couches de textile de lin (FRCCM.2L.FL.). Par exemple, elle a augmenté le taux d'exploitation des composites FRCCM.2L.FL de 70

% à 88 %, tout en améliorant la contrainte maximale de 26 % et en induisant un comportement en trois phases complètes, avec un motif de fissuration dense dès les faibles déformations. En effet, La pré-imprégnation optimise la pénétration de la matrice dans les filaments internes du textile, réduisant ainsi la porosité et améliorant l'adhérence interfaciale textile-matrice. Elle garantit une répartition uniforme des contraintes, réduit les concentrations locales de contraintes et améliore la rigidité de la deuxième phase ( $E_2$ ), avec une réduction moins marquée de la rigidité dans les composites pré-imprégnés (94 à 95 %) par rapport aux non-pré-imprégnés (97.8 à 98 %). Cette technique réduit la chute des charge marquant l'apparition des fissures et améliore la capacité de dissipation d'énergie pendant la fissuration et la propagation des microfissures, augmentant ainsi la ductilité des composites. De plus, la pré-imprégnation a considérablement amélioré le comportement en fissuration des composites FRCM.2L.FL.I par rapport aux composites FRCM.2L.FL. Elle a permis d'augmenter le nombre de fissures de 8 à 16, tout en réduisant l'espacement entre celles-ci de 43 mm à 19 mm (Figure 7a), ainsi que la largeur des fissures de 2.7 mm à 1.1 mm (Figure 7b), soit une diminution d'environ 23 %. Ces améliorations traduisent une action composite efficace, caractérisée par une répartition plus uniforme des contraintes et une réduction significative de la longueur de transfert de charge, intrinsèquement liée à l'espacement réduit entre les fissures. Cependant, la rigidité de la troisième phase reste inchangée, étant déterminée principalement par les propriétés intrinsèques du textile après la rupture complète de la matrice. Enfin, la pré-imprégnation limite les glissements télescopiques entre les filaments externes et internes du textile, permettant une rupture du textile près du milieu de l'éprouvette qui le mode le plus souhaité.

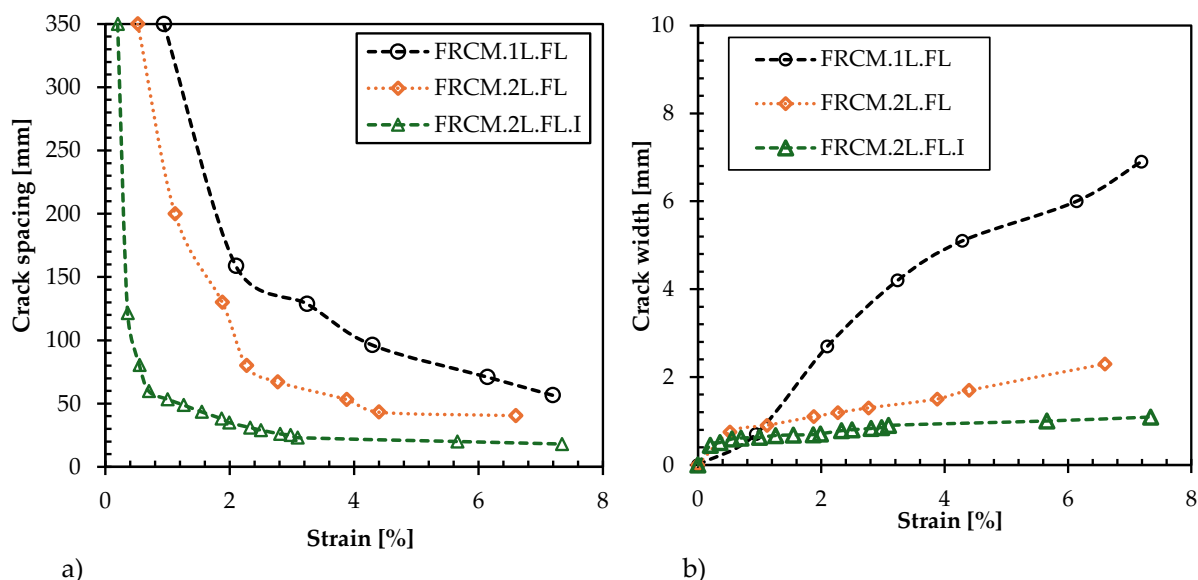


Figure 7. Effet de la pré-imprégnation et du taux de renfort : a) espacement entre fissures b) largeur de fissure

### C. Influence du taux de renfort

Le taux de renforcement constitue un paramètre essentiel pour évaluer l'efficacité des systèmes de renforcement dans les composites FRCM. L'analyse des résultats révèle que l'augmentation du taux de renforcement ont amélioré considérablement les propriétés mécaniques, notamment la contrainte de fissuration initiale ( $\sigma_1$ ), la contrainte maximale ( $\sigma_{max}$ ) et les rigidités  $E_1$ ,  $E_2$  et  $E_3$ . Par exemple, les composites à deux couches de textile présentent des contraintes maximales jusqu'à 2.96 fois supérieures pour les Jute-FRCM, 2.8 fois pour les Flax-FRCM et 2.25 fois pour les Carbon-FRCM par rapport aux composites à une seule couche. De plus, le taux d'exploitation du textile atteint 70 % pour le FRCM.2L.J contre 50 % pour le FRCM.1L.J, traduisant une meilleure efficacité du textile avec l'augmentation du renforcement. Une réduction des chutes de charges a également été observée avec un taux de renforcement plus élevé. Ces améliorations peuvent être attribuées à une redistribution plus uniforme des contraintes et à la diminution des concentrations locales de contraintes. Cependant, l'augmentation du taux de

renforcement n'a pas produit d'effets significatifs sur les composites Carbon-FRCM, ni modifié les phénomènes de délaminage. Les phénomènes de délaminage et les ruptures prématurées, ont empêché une exploitation optimale du textile carbone, qui n'a atteint qu'un taux d'exploitation de 13 %. Cette faible performance souligne l'importance du choix des matériaux constitutifs, notamment la matrice et les textiles, pour garantir une compatibilité optimale entre les composants et éviter les défaillances prématurées. Ces résultats soulignent l'importance de la sélection adéquate des matrices et des textiles pour garantir une bonne compatibilité des composants. Une interaction optimale entre le textile et la matrice est essentielle pour exploiter pleinement les capacités mécaniques du composite et prévenir les défaillances prématurées.

#### D. Influence des fibres courtes de lin

Les courbes contrainte-déformation des composites renforcés avec des fibres courtes de lin montrent une amélioration marquée du comportement en traction par rapport aux composites non renforcés, en particulier dans la phase de fissuration. Ces composites affichent un motif de fissures plus dense, une réduction de l'amplitude des chutes de charge, ainsi qu'une diminution de la largeur des fissures et de l'espacement entre elles. L'ajout de fibres courtes permet d'anticiper l'apparition de la troisième phase de la réponse en traction en limitant la propagation des fissures et en réduisant la déformabilité de la phase II. Par exemple, les composites FRCM.1L.J.F et FRCM.2L.J.F démontrent une capacité élevée de dissipation d'énergie dans la phase II, grâce à des pertes de charge réduites. Ces propriétés sont particulièrement avantageuses dans des contextes de sollicitations dynamiques telles que les séismes.

Les fibres courtes de lin augmentent également le taux d'exploitation des textiles, comme en témoignent les composites FRCM.2L.J et FRCM.2L.J.F, dont les taux d'exploitation passent de 53 % à 76 %, soit une amélioration de 23 %. Cette amélioration est due à un renforcement de l'interface textile-matrice, une réduction des zones de faiblesse à l'interface textile-matrice, ainsi qu'à une stabilisation des fissures. L'analyse par CIN (Figure 6) du mécanisme de fissuration confirme les effets positifs de l'ajout des fibres courtes de lin : on observe une réduction de la largeur des fissures de 32 % (Figure 8b) pour le composite FRCM.1L.J.F par rapport au composite FRCM.1L.J. De plus, le nombre de fissures augmente de 3 à 8, avec un espacement entre elles passant de 145 mm à 29 mm pour les composites FRCM.1L.J.F par rapport aux composites FRCM.1L.J (Figure 8a).

Les fibres courtes de lin agissent également comme des ponts au niveau des fissures, limitant leur propagation et améliorant ainsi la durabilité du composite. Ces résultats soulignent que l'intégration des fibres courtes dans les FRCM renforce principalement l'interface textile-matrice, optimisant ainsi les performances en traction sans altérer les propriétés globales de déformation.

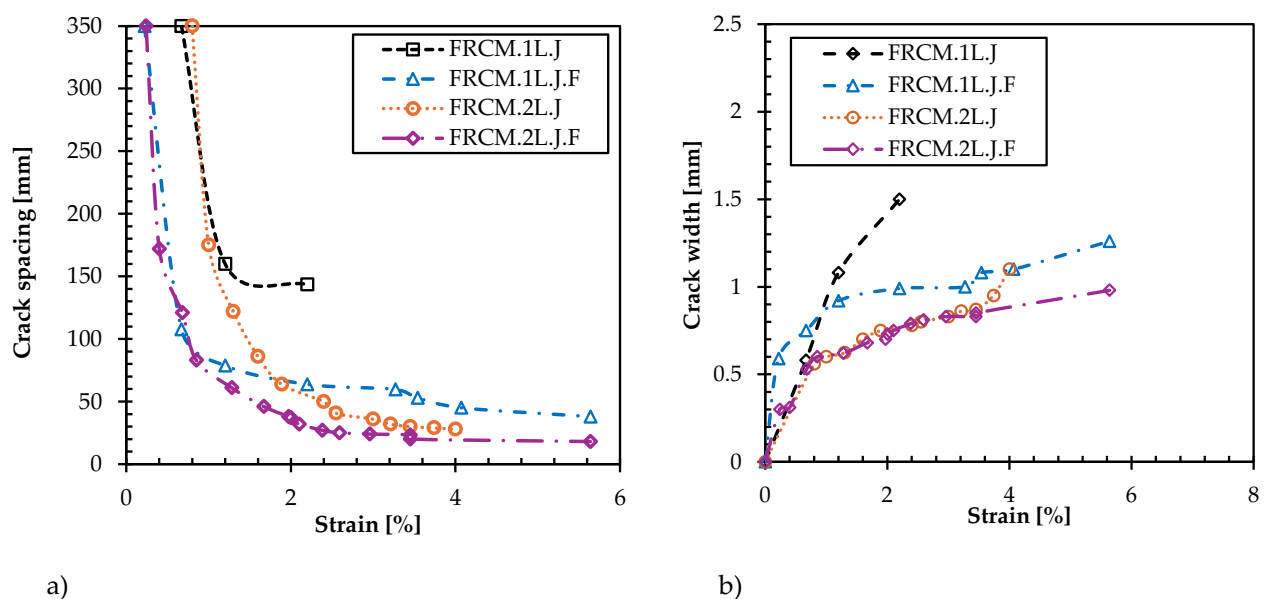


Figure 8. Effet des fibres courtes de lin: a) espacement entre fissures b) largeur de fissure

#### IV. CONCLUSION

Cette étude expérimentale a exploré les interactions complexes entre les textiles, la matrice minérale et leur interface dans les composites FRCM. En mettant l'accent sur les textiles naturels (lin et jute) et synthétiques (carbone), elle a permis d'évaluer l'impact de paramètres clés tels que la pré-impregnation, l'ajout de fibres courtes et le taux de renforcement sur les performances mécaniques des composites. Les résultats ont révélé que l'adhérence textile-matrice, la stabilité des fissures et la répartition des contraintes jouent un rôle déterminant dans l'amélioration des propriétés mécaniques.

Les principales conclusions suivantes peuvent être tirées de cette campagne expérimentale :

- Les composites FRCM renforcés par des textiles végétaux (lin, jute) ou synthétiques (carbone) présentent des comportements mécaniques distincts. Les textiles de lin et de jute offrent un équilibre entre résistance mécanique et flexibilité, avec des taux d'exploitation atteignant 70 % pour les composites à deux couches de textile de lin, tandis que les textiles de carbone, bien que rigides et résistants, atteignent des taux d'exploitation limités (13 %) en raison de phénomènes de délaminage.
- La pré-impregnation des textiles dans une matrice minérale améliore l'adhérence textile-matrice, réduit la porosité et augmente le taux d'exploitation des textiles, passant de 70 % à 88 % pour les composites FRCM à base de lin. Cette méthode optimise également la répartition des contraintes et réduit les pertes de charge, tout en améliorant la densité et la stabilité des fissures.
- L'incorporation de fibres courtes de lin dans la matrice contribue significativement à la réduction des chutes de charge, à la stabilisation des fissures dans composites FRCM et à une augmentation du taux d'exploitation des textiles, atteignant 76 % pour les composites Jute-FRCM.
- L'augmentation du taux de renforcement améliore la contrainte maximale, la rigidité et la densité des fissures. Cependant, cette amélioration reste conditionnée par une bonne interaction textile-matrice.

Les résultats mettent en évidence l'importance d'une bonne compatibilité entre les textiles, la matrice et les traitements spécifiques comme la pré-impregnation ou l'ajout de fibres courtes. Ces ajustements permettent d'améliorer les performances mécaniques des composites FRCM végétaux, rendant ces matériaux plus adaptés aux exigences de durabilité et de renforcement structurel, tout en répondant aux défis environnementaux.

#### REFERENCES

- Agossou, O.G., Amziane, S., 2023. Analysis of Mechanical and Thermal Performance and Environmental Impact of Flax-Fiber-Reinforced Gypsum Boards. *Buildings* 13, 3098. <https://doi.org/10.3390/buildings13123098>
- Agossou, O.G., Homoro, O., Amziane, S., 2025. A review of the applications of natural FRCM composites. *J. Compos. Mater.* 00219983251318829. <https://doi.org/10.1177/00219983251318829>
- Agossou, O.G., Homoro, O., Amziane, S., 2024. Evaluation of mechanical behaviour of vegetal FRCM composites through the DIC technique: Effects of textile pre-impregnation and short flax fibres. *Constr. Build. Mater.* 449, 138416. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138416>
- Akhoundi, F., Vasconcelos, G., Lourenço, P., Silva, L.M., Cunha, F., Fangueiro, R., 2018. In-plane behavior of cavity masonry infills and strengthening with textile reinforced mortar. *Eng. Struct.* 156, 145–160. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.002>
- Ascione, L., Feo, L., Fraternali, F., 2005. Load carrying capacity of 2D FRP/strengthened masonry structures. *Compos. Part B Eng.* 36, 619–626. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.12.004>
- Bardouh, R., Homoro, O., Amziane, S., 2024. Effect of reinforcement ratio and textile pre-impregnation on the mechanical properties of flax textile reinforced sulfoaluminate matrix. *J. Compos. Mater.* 58, 265–284. <https://doi.org/10.1177/00219983231221146>

- Caggegi, C., Carozzi, F.G., De Santis, S., Fabbrocino, F., Focacci, F., Hojdys, Ł., Lanoye, E., Zuccarino, L., 2017. Experimental analysis on tensile and bond properties of PBO and aramid fabric reinforced cementitious matrix for strengthening masonry structures. *Compos. Part B Eng.* 127, 175–195. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.048>
- Caporale, A., Feo, L., Luciano, R., Penna, R., 2013. Numerical collapse load of multi-span masonry arch structures with FRP reinforcement. *Compos. Part B Eng.* 54, 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.042>
- Carozzi, F.G., Bellini, A., D'Antino, T., de Felice, G., Focacci, F., Hojdys, Ł., Laghi, L., Lanoye, E., Micelli, F., Panizza, M., Poggi, C., 2017. Experimental investigation of tensile and bond properties of Carbon-FRCM composites for strengthening masonry elements. *Compos. Part B Eng.* 128, 100–119. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.018>
- Ceci, A.M., Contento, A., Fanale, L., Galeota, D., Gattulli, V., Lepidi, M., Potenza, F., 2010. Structural performance of the historic and modern buildings of the University of L'Aquila during the seismic events of April 2009. *Eng. Struct., Learning from Structural Failures* 32, 1899–1924. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.12.023>
- Cevallos, O.A., Olivito, R.S., 2015. Effects of fabric parameters on the tensile behaviour of sustainable cementitious composites. *Compos. Part B Eng.* 69, 256–266. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.004>
- Codispoti, R., Oliveira, D.V., Olivito, R.S., Lourenço, P.B., Fangueiro, R., 2015. Mechanical performance of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry. *Compos. Part B Eng.* 77, 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.021>
- Coroller, G., Lefeuvre, A., Le Duigou, A., Bourmaud, A., Ausias, G., Gaudry, T., Baley, C., 2013. Effect of flax fibres individualisation on tensile failure of flax/epoxy unidirectional composite. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 51, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.03.018>
- de Carvalho Bello, C.B., Boem, I., Cecchi, A., Gattesco, N., Oliveira, D.V., 2019. Experimental tests for the characterization of sisal fiber reinforced cementitious matrix for strengthening masonry structures. *Constr. Build. Mater.* 219, 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.168>
- de Felice, G., Aiello, M.A., Bellini, A., Ceroni, F., De Santis, S., Garbin, E., Leone, M., Lignola, G.P., Malena, M., Mazzotti, C., Panizza, M., Valluzzi, M.R., 2016. Experimental characterization of composite-to-brick masonry shear bond. *Mater. Struct.* 49, 2581–2596. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0669-4>
- de Felice, G., Aiello, M.A., Caggegi, C., Ceroni, F., De Santis, S., Garbin, E., Gattesco, N., Hojdys, Ł., Krajewski, P., Kwiecień, A., Leone, M., Lignola, G.P., Mazzotti, C., Oliveira, D., Papanicolaou, C., Poggi, C., Triantafyllou, T., Valluzzi, M.R., Viskovic, A., 2018. Recommendation of RILEM Technical Committee 250-CSM: Test method for Textile Reinforced Mortar to substrate bond characterization. *Mater. Struct.* 51, 95. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1216-x>
- De Santis, S., Carozzi, F.G., de Felice, G., Poggi, C., 2017a. Test methods for Textile Reinforced Mortar systems. *Compos. Part B Eng.* 127, 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.016>
- De Santis, S., Ceroni, F., de Felice, G., Fagone, M., Ghiassi, B., Kwiecień, A., Lignola, G.P., Morganti, M., Santandrea, M., Valluzzi, M.R., Viskovic, A., 2017b. Round Robin Test on tensile and bond behaviour of Steel Reinforced Grout systems. *Compos. Part B Eng.* 127, 100–120. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.052>
- Ferrara, G., Caggegi, C., Gabor, A., Martinelli, E., 2019. Experimental Study on the Adhesion of Basalt Textile Reinforced Mortars (TRM) to Clay Brick Masonry: The Influence of Textile Density. *Fibers* 7, 103. <https://doi.org/10.3390/fib7120103>
- Ferrara, G., Pepe, M., Martinelli, E., Tolêdo Filho, R.D., 2021. Tensile behavior of flax textile reinforced lime-mortar: Influence of reinforcement amount and textile impregnation. *Cem. Concr. Compos.* 119, 103984. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103984>
- Focacci, F., D'Antino, T., Carloni, C., 2022. Tensile Testing of FRCM Coupons for Material Characterization: Discussion of Critical Aspects. *J. Compos. Constr.* 26, 04022039. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001223](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001223)
- Focacci, F., D'Antino, T., Carloni, C., 2020. The role of the fiber–matrix interfacial properties on the tensile behavior of FRCM coupons. *Constr. Build. Mater.* 265, 120263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120263>
- Hollaway, L.C., 2010. A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Constr. Build. Mater., Special Issue on Fracture, Acoustic Emission and NDE in Concrete (KIFA-5)* 24, 2419–2445. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.062>
- Hollaway, L.C., Cadei, J., 2002. Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites. *Prog. Struct. Eng. Mater.* 4, 131–148. <https://doi.org/10.1002/pse.112>
- Indirli, M., S. Kouris, L.A., Formisano, A., Borg, R.P., Mazzolani, F.M., 2013a. Seismic Damage Assessment of Unreinforced Masonry Structures After The Abruzzo 2009 Earthquake: The Case Study of the Historical

- Centers of L'Aquila and Castelvechio Subequo. *Int. J. Archit. Herit.* 7, 536–578. <https://doi.org/10.1080/15583058.2011.654050>
- Indirli, M., S. Kouris, L.A., Formisano, A., Borg, R.P., Mazzolani, F.M., 2013b. Seismic Damage Assessment of Unreinforced Masonry Structures After The Abruzzo 2009 Earthquake: The Case Study of the Historical Centers of L'Aquila and Castelvechio Subequo. *Int. J. Archit. Herit.* 7, 536–578. <https://doi.org/10.1080/15583058.2011.654050>
- Junaid, K., Zyed, M., Nonna, A., Gaochuang, C., Amir, S.L., 2024. Tensile and cracking behaviour of crimped textile reinforced mortar (TRM) based on digital image correlation. *Constr. Build. Mater.* 417, 135321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135321>
- Kaplan, H., Bilgin, H., Yilmaz, S., Binici, H., Öztas, A., 2010. Structural damages of L'Aquila (Italy) earthquake. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10, 499–507. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-499-2010>
- Lebrun, G., Couture, A., Laperrière, L., 2013. Tensile and impregnation behavior of unidirectional hemp/paper/epoxy and flax/paper/epoxy composites. *Compos. Struct.* 103, 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.04.028>
- Leone, M., Aiello, M.A., Balsamo, A., Carozzi, F.G., Ceroni, F., Corradi, M., Gams, M., Garbin, E., Gattesco, N., Krajewski, P., Mazzotti, C., Oliveira, D., Papanicolaou, C., Ranocchiai, G., Roscini, F., Saenger, D., 2017. Glass fabric reinforced cementitious matrix: Tensile properties and bond performance on masonry substrate. *Compos. Part B Eng.* 127, 196–214. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.028>
- Lignola, G.P., Caggegi, C., Ceroni, F., De Santis, S., Krajewski, P., Lourenço, P.B., Morganti, M., Papanicolaou, C. (Corina), Pellegrino, C., Prota, A., Zuccarino, L., 2017. Performance assessment of basalt FRCM for retrofit applications on masonry. *Compos. Part B Eng.* 128, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.003>
- Marcari, G., Manfredi, G., Prota, A., Pecce, M., 2007. In-plane shear performance of masonry panels strengthened with FRP. *Compos. Part B Eng.* 38, 887–901. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.11.004>
- Mercedes, L., Bernat-Maso, E., Gil, L., 2020. In-plane cyclic loading of masonry walls strengthened by vegetal-fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) composites. *Eng. Struct.* 221, 111097. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111097>
- Mercedes, L., Gil, L., Bernat-Maso, E., 2018. Mechanical performance of vegetal fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites. *Constr. Build. Mater.* 175, 161–173. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.171>
- Papanicolaou, C., Triantafyllou, T., Lekka, M., 2011. Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels. *Constr. Build. Mater., Composite Materials and Adhesive Bonding Technology* 25, 504–514. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.018>
- Papanicolaou, C.G., Triantafyllou, T.C., Karlos, K., Papathanasiou, M., 2007. Textile-reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in-plane cyclic loading. *Mater. Struct.* 40, 1081–1097. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9207-8>
- Papanicolaou, C.G., Triantafyllou, T.C., Papathanasiou, M., Karlos, K., 2008. Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: out-of-plane cyclic loading. *Mater. Struct.* 41, 143–157. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9226-0>
- Penna, A., Morandi, P., Rota, M., Manzini, C.F., da Porto, F., Magenes, G., 2014. Performance of masonry buildings during the Emilia 2012 earthquake. *Bull. Earthq. Eng.* 12, 2255–2273. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9496-6>
- Placet, V., Trivaudey, F., Cisse, O., Gucheret-Retel, V., Boubakar, M.L., 2012. Diameter dependence of the apparent tensile modulus of hemp fibres: A morphological, structural or ultrastructural effect? *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 43, 275–287. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.10.019>
- Prota, A., Manfredi, G., Nardone, F., 2008. Assessment of Design Formulas for In-Plane FRP Strengthening of Masonry Walls. *J. Compos. Constr.* 12, 643–649. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:6\(643\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:6(643))
- RILEM Technical Committee 232-TDT (Wolfgang Brameshuber), 2016. Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete: Uniaxial tensile test: test method to determine the load bearing behavior of tensile specimens made of textile reinforced concrete. *Mater. Struct.* 49, 4923–4927. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0839-z>
- Rousakis, T., 2017. 9 - Natural fibre rebar cementitious composites, in: Fan, M., Fu, F. (Eds.), *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*. Woodhead Publishing, pp. 215–234. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00009-1>
- Saidi, M., Gabor, A., 2020. Experimental analysis of the tensile behaviour of textile reinforced cementitious matrix composites using distributed fibre optic sensing (DFOS) technology. *Constr. Build. Mater.* 230, 117027. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117027>
- Standards, E., n.d. UNE EN ISO 13934-1:2013 Textiles - Tensile properties of fabrics - Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method (ISO 13934-1:2013) [WWW Document]. [Htppswwen-Stand. URL https://www.en-standard.eu/une-en-iso-13934-1-2013-textiles-](https://www.en-standard.eu/une-en-iso-13934-1-2013-textiles-)

- tensile-properties-of-fabrics-part-1-determination-of-maximum-force-and-elongation-at-maximum-force-using-the-strip-method-iso-13934-1-2013/ (accessed 6.4.24a).
- Standards, E., n.d. BS EN 196-1:2016 Methods of testing cement Determination of strength [WWW Document]. [Httpswwwen-Stand. URL https://www.en-standard.eu/bs-en-196-1-2016-methods-of-testing-cement-determination-of-strength/](https://www.en-standard.eu/bs-en-196-1-2016-methods-of-testing-cement-determination-of-strength/) (accessed 5.26.24b).
- Triantafillou, T.C., 1998. Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP Laminates. *J. Compos. Constr.* 2, 96–104. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1998\)2:2\(96\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:2(96))
- Trochoutsou, N., Di Benedetti, M., Pilakoutas, K., Guadagnini, M., 2021. Mechanical Characterisation of Flax and Jute Textile-Reinforced Mortars. *Constr. Build. Mater.* 271, 121564. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121564>
- Valluzzi, M.R., Tinazzi, D., Modena, C., 2002. Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates. *Constr. Build. Mater.* 16, 409–416. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00043-0](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00043-0)