

Etude multi-échelles du comportement mécanique d'un éco-composite textile végétal-matrice minérale : application au renforcement des bétons végétaux

Oladikpo Gatien AGOSSOU

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

RESUME Aujourd'hui, le secteur du bâtiment consomme 44 % de l'énergie nationale et émet chaque année plus de 123 millions de tonnes de dioxyde de carbone, tout en contribuant à l'épuisement des ressources non renouvelables. Cela en fait l'un des domaines clés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la transition énergétique. Une solution à cette problématique réside dans l'utilisation de matériaux à faible impact environnemental, tels que les bétons végétaux. Cependant, en raison de leurs faibles performances mécaniques, leur attractivité reste limitée dans le secteur de la construction, en particulier pour les applications structurelles. Pour pallier ces limitations, les composites FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix) ont été étudiés comme une solution innovante, combinant des textiles végétaux (lin) avec des matrices minérales. L'approche expérimentale adoptée inclut plusieurs essais, notamment des tests d'arrachement pour évaluer l'adhérence textile-matrice, des essais de traction directe couplés à la corrélation d'images numériques (CIN) pour analyser la réponse des composites FRCM, ainsi que des essais d'adhérence FRCM/béton de chanvre et des tests de compression diagonale sur des murs en béton de chanvre renforcés afin d'évaluer leur capacité de charge. Les résultats ont montré que la préimprégnation des textiles de lin dans la matrice minérale et l'ajout de fibres courtes de lin améliorent significativement l'adhérence textile-matrice et la dissipation d'énergie des composites FRCM. Le renforcement des murs en béton de chanvre avec ces composites permet d'augmenter leur capacité de charge jusqu'à 500 %, tout en améliorant leur résistance au cisaillement et leur ductilité. Ainsi, ces composites FRCM à base de lin constituent une solution prometteuse et durable pour le renforcement des éléments en béton végétal, offrant des performances comparables aux systèmes traditionnels tout en s'inscrivant dans une approche respectueuse de l'environnement.

Mots-clés : Béton végétal, FRCM végétal, interface textile-matrice, renforcement, cisaillement.

I. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment est l'un des principaux contributeurs au réchauffement climatique, consommant près de 44 % de l'énergie nationale en France et émettant plus de 123 millions de tonnes de dioxyde de carbone chaque année. Face à ces défis environnementaux, l'utilisation de matériaux à faibles impacts environnementaux, appelés éco-matériaux, s'impose comme une priorité pour favoriser la transition énergétique. Parmi ces solutions, la maçonnerie en terre est depuis longtemps reconnue pour ses qualités durables, écologiques et économiques. Cependant, cette ressource non renouvelable présente des limites liées à son extraction, justifiant l'intérêt pour des alternatives renouvelables, comme les bétons végétaux. Ces bétons végétaux, tels que le béton de chanvre, se distinguent par leur faible empreinte carbone, leur capacité à stocker du carbone, et leurs excellentes propriétés hygrothermiques. Ces matériaux innovants, composés de liants minéraux et de granulats végétaux, répondent aux exigences de durabilité et d'efficacité énergétique. Toutefois, leur faible résistance mécanique, notamment en traction, compression et cisaillement, limite leur utilisation dans des applications structurelles. Ces faiblesses, combinées à un manque de directives constructives, réduisent leur

attractivité dans le secteur du bâtiment, en particulier sous des charges importantes ou dans des zones sismiques.

Les éléments non porteurs des ouvrages en maçonnerie ou en béton végétal sont particulièrement vulnérables face à des sollicitations latérales, telles que les séismes ou les phénomènes de retrait-gonflement. Pour pallier ces limitations, le développement de matériaux composites de renforcement a suscité un intérêt croissant. Parmi eux, les FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix) ont émergé comme une solution innovante (Agossou et al., 2024; Ferrara et al., 2021; Papanicolaou et al., 2008; Trochoutsou et al., 2021a). Ces composites, constitués de textiles (végétaux ou synthétiques) et de matrices minérales, offrent des avantages significatifs par rapport aux polymères renforcés de fibres (FRP), notamment une meilleure compatibilité chimique et mécanique avec les substrats en maçonnerie, une perméabilité à la vapeur et une résistance au feu (Papanicolaou et al., 2007).

L'utilisation de textiles végétaux (lin, chanvre, jute, etc.) dans les composites FRCM ouvre de nouvelles perspectives pour des solutions à faible impact environnemental. Des études récentes ont démontré leur efficacité dans le renforcement des maçonneries, améliorant la résistance au cisaillement, la ductilité et la dissipation d'énergie, essentielles pour les zones sismiques. Par exemple, (Ferrara et al., 2020) ont observé une augmentation de 118 % à 136 % de la capacité de cisaillement dans des murs renforcés avec des FRCM à base de lin, tandis que (Bardouh et al., 2024) ont montré que l'utilisation de Lin-FRCM sur des bétons de chanvre permettait d'accroître la charge maximale en flexion de 17530 % et la résistance en compression de 531 %.

Malgré ces quelques résultats prometteurs, certaines limitations persistent, notamment la faible résistance au cisaillement des murs en béton végétal soumis à des sollicitations dynamiques ou cycliques. De plus, le comportement en cisaillement du béton végétal est peu étudié dans la littérature scientifique à ce jour. Cette étude vise à explorer ces limitations et à proposer des améliorations en adoptant une approche multi-échelles. D'une part, cette approche combine des essais d'arrachement pour étudier l'interface textile-matrice et des essais de traction directe couplés à la corrélation d'images numériques (CIN), afin d'évaluer les performances globales des composites. D'autre part, elle se concentre sur la caractérisation de l'adhérence entre les composites FRCM et le béton végétal, et l'évaluation du comportement en cisaillement des bétons végétaux renforcés par ces composites FRCM, sous compression diagonale.

II. Matériaux et méthodes

A. Matériaux

Les composites FRCM et les échantillons pour les essais d'arrachement de cette campagne expérimentale ont été élaborés en utilisant des textiles bidirectionnels en lin et carbone, associés à une matrice minérale dénommée Ciment Naturel Prompt (CNP). Les propriétés physiques des textiles sont détaillées dans le [Tableau 1](#). La matrice minérale (Liant + Eau) a été préparée avec un rapport Eau/CNP de 0.5, puis coulée dans des moules de dimensions $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$. Ses performances mécaniques ont été évaluées après 28 jours de durcissement, conformément à la norme ("NF EN 196-1," n.d.). Les résistances moyennes à la compression et à la flexion sont respectivement de 8.64 MPa (Co.V : 6.4 %) et de 2.3 MPa (Co.V : 5.36 %).

Par ailleurs, des fibres courtes de lin, d'une longueur de 6 mm, ont été incorporées à la matrice avec une fraction volumique de 0.5 %, en maintenant un rapport massique Eau/CNP de 0.7. La longueur de 6 mm et le taux de 0.5 % ont été spécifiquement choisis afin d'assurer une dispersion homogène des fibres au sein de la matrice, tout en limitant les risques d'agglomération ou de ségrégation pendant le malaxage. Les principales caractéristiques physiques et mécaniques de ces fibres sont présentées dans le [Tableau 2](#).

Tableau 1. Caractéristiques des textiles

	<i>Lin</i>	<i>Carbone</i>
Taille des mailles [mm x mm]	3x3	5x5
Poids surfacique [g/m ²]	300*/328	320*/330
Densité linéaire [Tex]	324*	-
Densité apparente [g/cm ³]	1.50*	-
Diamètre/épaisseur équivalente [mm]	0.525	0.052
Section transversale du fil [mm ²]	0.216	0.625
Nombre de fils/cm dans la section longitudinale	4.30	1.33
Nombre de fils/cm dans la section transversale	4.30	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'essais de traction directe [17], réalisés sur des bandes de textile de 500 mm de longueur et 60 mm de largeur. Chaque bande comprenait respectivement 26 et 8 fils pour les textiles de lin 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.

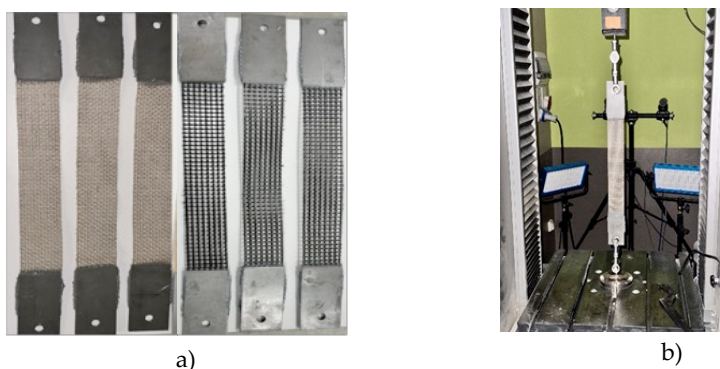


Figure 1. Caractérisation mécanique des textile: a) Bande de textile b) Test de traction

Tableau 3. Propriétés de traction des différents textiles

Textile	$\sigma_{text,max}$		$\epsilon_{text,max}$		E_{text}	
	[MPa]	Co.V [%]	[%]	Co.V [%]	[GPa]	Co.V [%]
Lin	265.15	4.52	2.89	6.65	14.22	5.47
Carbone	1775	2.47	2.90	7.78	96.1	4.68

$\sigma_{text,max}$: Résistance du textile

$\epsilon_{text,max}$: Déformation maximale

E_{text} : Rigidité du textile

B. Fabrication des éprouvettes

La fabrication des éprouvettes pour les essais d'arrachement implique l'encastrement d'une partie du textile dans une matrice minérale parallélépipédique, tout en laissant une longueur libre de textile pour l'application de la charge (Figure 2). Une longueur d'encastrement (L_e) de 100 mm a été adoptée. Les dimensions du bloc de matrice étaient de $50 \times 50 \times L_e$ mm³, tandis que la longueur totale des textiles utilisés était fixée à 375 mm. Cette configuration a été élaborée en s'appuyant sur des travaux de référence dans la littérature (Peled and Bentur, 2000; Saidi and Gabor, 2020), afin de garantir la reproductibilité des résultats. Les textiles de lin et de carbone ont été sélectionnés pour cette partie expérimentale (Figure 3). Les détails de cette étude feront l'objet de futures publications.

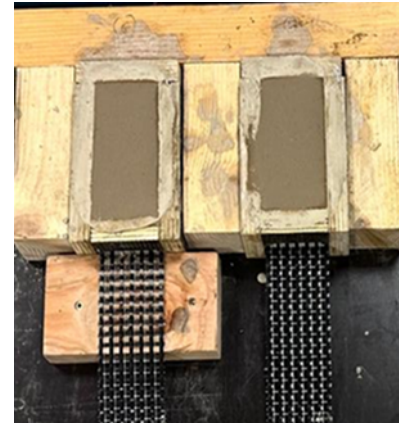
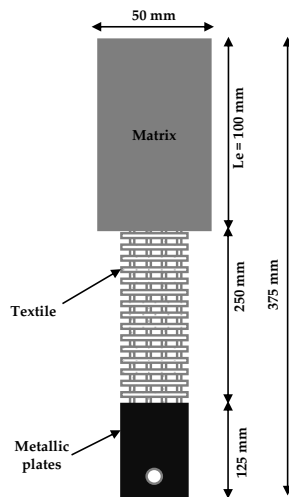


Figure 3. Fabrication des éprouvettes

Figure 2. Illustration des éprouvettes au test d'arrachement

Un total de 15 éprouvettes a été préparé, réparti comme suit :

- 3 éprouvettes avec du textile de lin sans modification :
✓ FL.10
- 3 éprouvettes avec du textile de lin (FL) et de fibres courtes de lin (F) ajoutées à la matrice :
✓ FL.10.F
- 3 éprouvettes avec du textile de lin (FL) préimprégné (I) dans la matrice minérale:
✓ FL.10.I
- 3 éprouvettes avec du textile de carbone:
✓ C.10
- 3 éprouvettes avec du textile de carbone et de fibres courtes de lin (F) ajoutées à la matrice:
✓ C.10.F.

Les éprouvettes des composites FRCM ont des dimensions de $500 \times 60 \times 10$ mm³ (Figure 4) et chaque éprouvette contient une ou deux couches de textile, découpées de manière à obtenir une section transversale uniforme comprenant respectivement 26 et 8 fils pour les textiles de lin et du carbone. L'objectif de cette partie expérimentale est d'établir une corrélation entre les effets des fibres courtes de lin, de la préimprégnation du textile dans la matrice minérale, du taux de renfort et du type de textile sur la réponse mécanique des composites FRCM.

Un total de 18 éprouvettes a été préparé, réparti comme suit :

- 6 éprouvettes comportant une seule couche (1L) de textile non modifié ont été réalisées, à raison de 3 éprouvettes par type de textile :
✓ Lin (FL) : FRCM.1L.FL
✓ Carbone (C) : FRCM.1L.C
- 6 éprouvettes avec deux couches (2L) de textile non modifié ont été réalisées, à raison de 3 éprouvettes par type de textile :
✓ FRCM.2L.FL

- ✓ FRCM.2L.C
- 3 éprouvettes avec du textile de lin (FL) et de fibres courtes de lin (F) ajoutées à la matrice :
 - ✓ FRCM.2L.FL.F
- 3 éprouvettes avec deux couches de textile de lin (FL) préimprégné (I) :
 - ✓ FRCM.2L.FL.I.

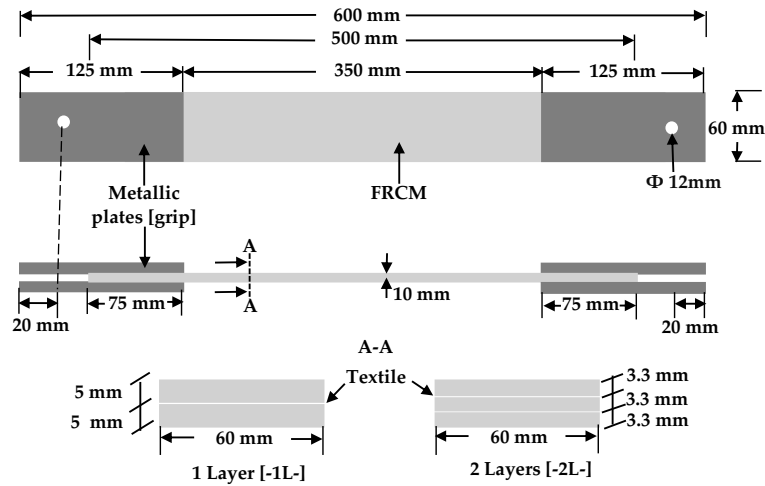


Figure 4. Schéma représentatif des composites FRCM

Les détails concernant la technique de fabrication des composites FRCM, ainsi que la méthode de préimprégnation des textiles de lin dans une matrice minérale, sont disponibles dans notre publication précédente (Agossou et al., 2024).

Pour l'étude de l'adhérence FRCM-béton végétal, les FRCM à base du textile du lin ont été directement coulés sur des blocs de béton de chanvre de dimensions 300x200x150 mm³ (Figure 5). Deux longueurs collées (150 mm et 200 mm) ont été appliquées pour les composites FRCM, d'une épaisseur de 10 mm, sur des blocs de béton de chanvre. Chaque configuration utilisait un textile d'une longueur totale de 500 mm. 6 éprouvettes ont été élaborées en raison de 3 par configuration avec des désignations suivantes :

- 3 éprouvettes avec une longueur collée de 150 mm du FRCM à base d'une couche du textile lin préimprégné dans la matrice minérale
 - ✓ Bond_150_HC
- 3 éprouvettes avec une longueur collée de 200 mm du FRCM à base d'une couche du textile lin préimprégné dans la matrice minérale
 - ✓ Bond_200_HC.



Figure 5. Préparation des éprouvettes FRCM/béton végétal

Dans cette étude, des mini-murs en béton de chanvre de dimensions $500 \times 500 \times 150 \text{ mm}^3$ ont été renforcés sur leurs deux faces (Figure 6) à l'aide de composites FRCM comportant une couche de textile de lin préimprégné, pour une épaisseur totale de 10 mm. Les mini-murs ont été coulés en une seule opération, avec un mélange présentant un rapport massique granulats (chènevotte)/eau/liant de 1:2:2. Un retardateur de prise (Tempo, Vicat) a été incorporé au CNP à raison de 7 g par kg de liant. Les murs ont été entièrement séchés avant l'application du renforcement FRCM.

Les éprouvettes ont ensuite été soumises à des essais de compression diagonale afin d'évaluer leur résistance au cisaillement (traction) ainsi que l'apport des FRCM végétaux à l'amélioration de la capacité de charge des bétons végétaux.

Les différentes configurations testées sont définies comme suit :

- WHC : Mini-mur non renforcé
- R_WHC : Mini-mur renforcé.

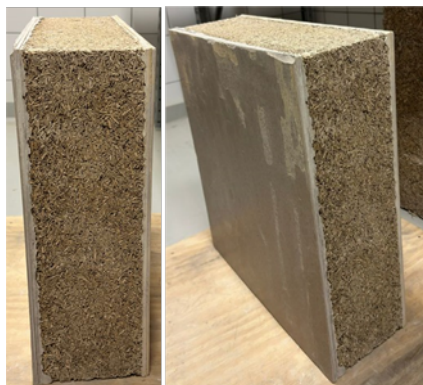


Figure 6. Mini-murs renforcés

C. Tests mécaniques

Avant les essais, des plaques métalliques ont été collées aux extrémités des textiles libres pour les éprouvettes destinées aux essais d'arrachement et aux 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 d'arrachement à l'interface textile-matrice (Figure 7), de traction directe sur les composites FRCM (Figure 8), ainsi que les essais de cisaillement simple évaluant l'adhérence entre le FRCM et le béton de chanvre (Figure 9), ont été réalisés à l'aide d'une presse électromécanique Zwick/Roell, d'une capacité maximale de 50 kN. Les essais de compression diagonale sur les mini-murs en béton de chanvre (Figure 10) ont été réalisés à l'aide électromécanique Zwick/Roell, dotée d'une capacité de 600 kN. Tous 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.

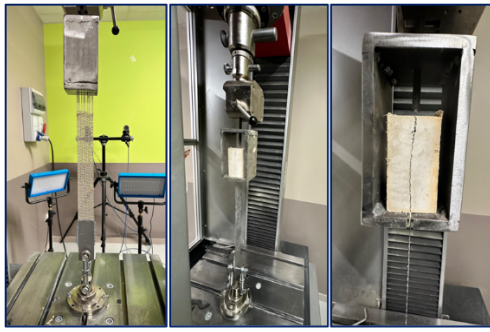


Figure 7. Montage de l'essai d'arrachement textile-matrice

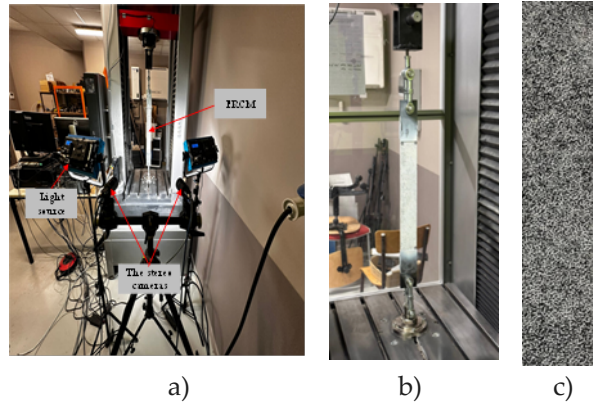


Figure 8. Dispositif d'essai de traction pour les composites FRCM : a) Vue d'ensemble b) Zoom du dispositif FRCM et c) Surface mouchetée pour CIN

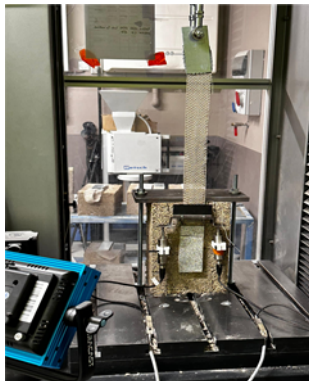


Figure 9. Test de cisaillement FRCM/béton végétal

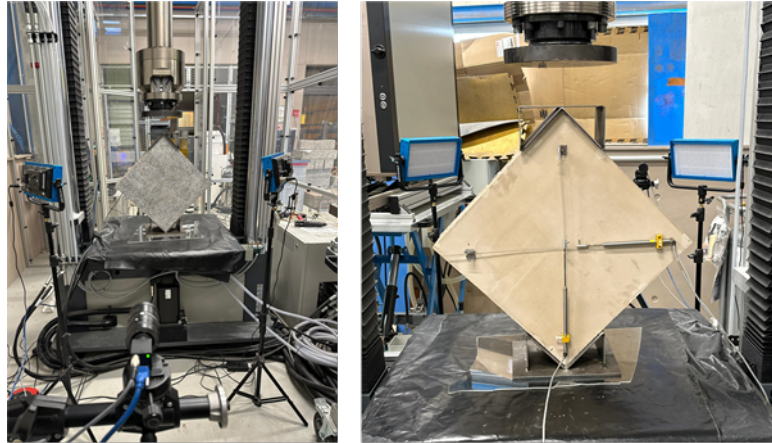


Figure 10. Test de compression diagonale

Pour les composites FRCM, un dispositif de corrélation d'images numériques (CIN) 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 [10], offrant une perspective complémentaire sur le comportement des composites FRCM étudiés.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Adhérence textile-matrice : Essai d'arrachement

Cette étude explore les influences croisées de la préimprégnation minérale, des fibres courtes de lin et des types de textiles sur les propriétés mécaniques et interfaciales textile-matrice. Les principaux résultats, représentés sur la Figure 11 et résumés dans le Tableau 4, mettent en évidence plusieurs tendances significatives.

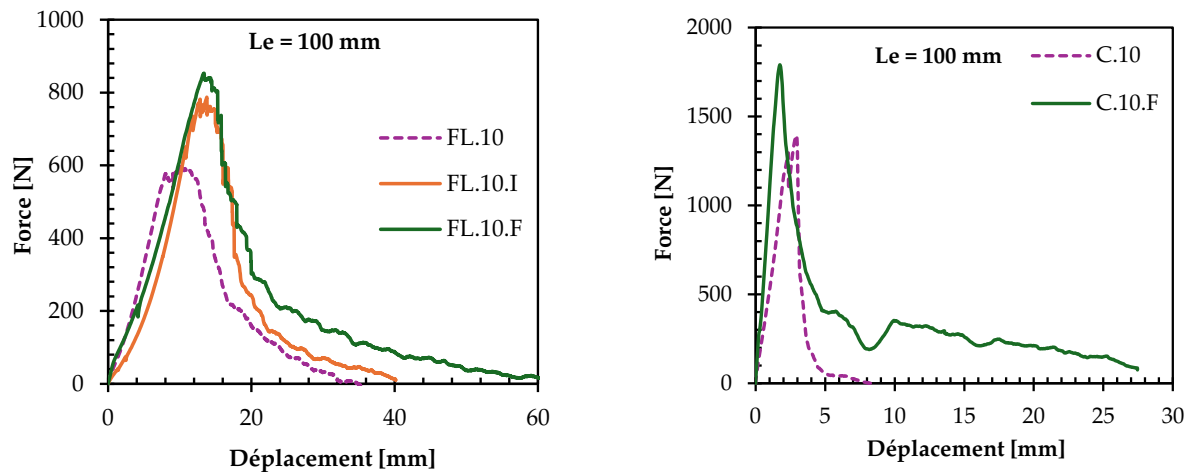


Figure 11. Courbes Force-déplacement de l'essai d'arrachement: a) textile de lin b) textile de carbone

Tableau 4. Propriétés mécaniques de l'essai d'arrachement

ID-éprouvette	P_{max} [N]	δ_{max} [mm]	$E_{d/max}$ [J]	μ [%]
FL.10	621.30	10.28	3.04	59.07
Co.V	2.99	5.70	10.32	2.99
FL.10.I	772.34	13.97	4.46	61.19
Co.V	2.71	2.02	11.42	2.71
FL.10.F	806.79	14.90	5.15	63.92
Co.V	4.96	8.94	4.39	4.96
C.10	1512.18	2.63	2.00	14.93
Co.V	11.10	16.13	18.38	11.10
C.10.F	1672.82	1.69	1.49	16.51
Co.V	6.47	7.39	8.41	6.47

P_{max} : Force maximale d'arrachement, δ_{max} : Déplacement correspondant à P_{max} , E_d : Dissipation d'énergie correspondant à P_{max} , μ [%] : Taux d'exploitation du textile.

La préimprégnation des textiles de lin dans une matrice minérale (FL.I) a montré des améliorations significatives de l'adhérence textile-matrice, avec une augmentation de la force maximale d'arrachement atteignant 24 % par rapport aux textiles non-préimprégnés (FL) (Tableau 4). Ce traitement améliore également la dissipation d'énergie, renforce la phase de frottement et stabilise davantage les fissures, contribuant à des performances mécaniques globales supérieures.

L'ajout de fibres courtes de lin dans la matrice minérale joue un rôle important dans le renforcement de l'interface textile-matrice. Ces fibres comblent les vides, limitent la propagation des fissures par un mécanisme de pontage et augmentent la capacité de charge des composites. En outre, elles réduisent les chutes de charge dans la phase de décollement tout en améliorant la répartition des contraintes dans la matrice, ce qui se traduit par une meilleure dissipation d'énergie et une augmentation significative de la force d'arrachement à plus de 30 % (Tableau 4).

En ce qui concerne les types de textiles, les différences dans les propriétés mécaniques et physiques des matériaux étudiés, tels que le lin et le carbone, ont un impact direct sur les performances des composites. Les textiles végétaux tissés, comme le lin, se distinguent par leur adaptabilité supérieure aux déformations et par leur capacité à favoriser des mécanismes de frottement efficaces grâce à leur structure entrelacée. Les résultats montrent également que la densité linéaire et les propriétés de surface des textiles influencent de manière significative la pénétrabilité de la matrice ainsi que la qualité de l'interface textile-matrice. Par exemple, les textiles de lin, avec une densité de fils de 4.3/cm, permettent une répartition plus homogène des contraintes, contrairement aux textiles de carbone (imprégné dans

une résine par le fabricant), qui présentent une densité de fils plus faible (1.33/cm). Cependant, il convient de noter qu'une densité de fils trop élevée peut entraver la bonne imprégnation de la matrice, compromettant ainsi l'adhésion et la cohésion du composite. D'un autre côté, les textiles de carbone se distinguent par leur résistance et leur rigidité à la traction extrêmement élevées (**Tableau 3**) par rapport aux textiles de lin. Toutefois, cette rigidité intrinsèque limite leur capacité à s'adapter aux déformations de la matrice sous charge. Cela entraîne fréquemment un délaminage à l'interface textile-matrice, réduisant leur taux d'exploitation effectif à seulement 15 % (**Tableau 4**). De plus, la résistance à la rupture des textiles de carbone dépasse souvent la capacité de l'interface textile-matrice à absorber les contraintes, provoquant une rupture prématurée par désadhésion. Ce comportement met en évidence une incompatibilité mécanique entre la rigidité des textiles de carbone et la flexibilité relative de la matrice minérale. Cette discordance compromet les performances globales du composite, soulignant l'importance d'un équilibre entre les propriétés mécaniques des textiles et celles de la matrice pour optimiser l'efficacité structurelle du matériau.

En termes de comportement global, les composites renforcés par des textiles de lin ont montré un équilibre remarquable entre résistance mécanique, flexibilité et capacité de dissipation d'énergie. Avec un taux d'exploitation d'environ 60 %, ces composites se révèlent particulièrement adaptés aux applications nécessitant à la fois des performances mécaniques élevées et une bonne ductilité.

B. Comportement mécanique du composite FRCM : Essai de traction directe

Les propriétés interfaciales textile-matrice régissent principalement le comportement mécanique des composites FRCM. L'influence de la préimprégnation du textile dans la matrice minérale ainsi que de l'ajout de fibres courtes de lin a été analysée à l'échelle des composites Lin-FRCM. Les contraintes ont été définies comme le rapport entre la force de traction et la section transversale ($60 \times 10 \text{ mm}^2$) du composite. Afin d'éviter l'obtention de valeurs de déformation irréalistes pouvant résulter de gradients de déplacement localisés, les champs de déplacement issus de la CIN n'ont pas été utilisés pour extraire les champs de déformation de surface 2D, comme l'ont fait (Donnini et al., 2019) en utilisant la théorie de Cauchy-Green, qui prend en compte les grands déplacements et la théorie des grandes déformations. Cependant, des extensomètres virtuels ont été utilisés durant l'analyse de CIN pour extraire les valeurs de déplacement longitudinal. La déformation axiale a donc été calculée comme le rapport entre les valeurs de déplacement longitudinal et la longueur de jauge sélectionnée (350 mm dans ce cas).

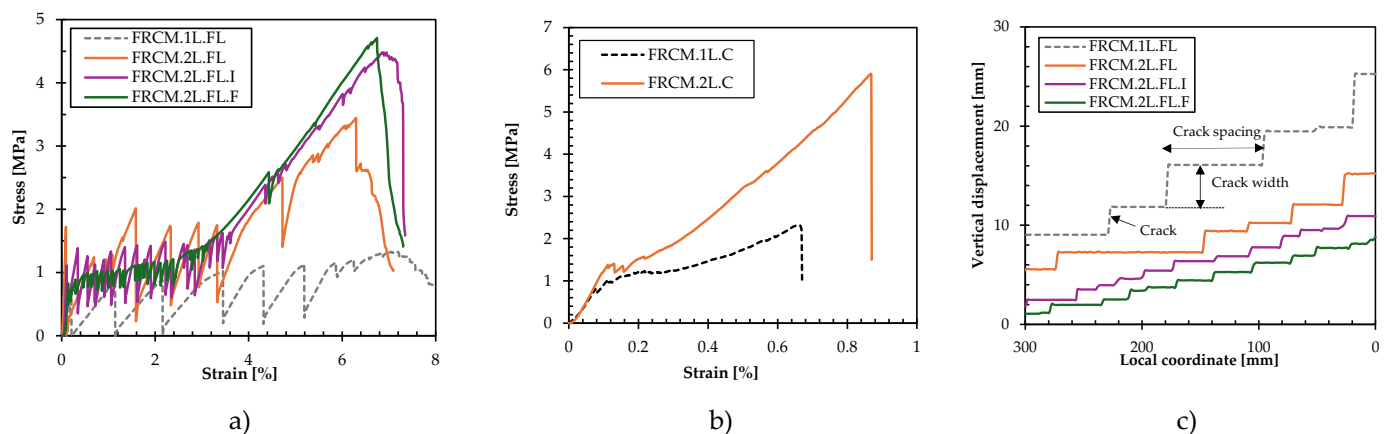


Figure 12. Comportement mécanique des composites FRCM : a) Courbes contrainte-déformation des composites Lin-FRCM b) Courbes contrainte-déformation des composites Carbone-FRCM c) Exemple du mécanisme de fissuration des composites Lin-FRCM

La Figure 12 illustre le comportement en traction des composites FRCM. Quatre principales zones peuvent être identifiées et définies comme suit :

- (i) Une première zone élastique quasi-linéaire caractérisée par la fissuration de la matrice. L'apparition de la première fissure marque généralement la résistance ultime en traction de la matrice.

- (ii) Une seconde zone non linéaire marquée par le développement de multiples fissures dans la matrice. Le motif de fissuration sur toute la longueur de l'éprouvette dépend fortement d'une part, des paramètres de la loi décrivant la liaison textile-matrice (les propriétés physiques du textile, la pénétrabilité de la matrice dans les filaments du textile, etc.) et d'autre part, des paramètres de la loi décrivant la fissure de la matrice (longueur de transfert de charge, le taux de renfort, etc.). Il est donc important de souligner que les chutes de charge marquent l'apparition d'une fissure et ceci se produit à chaque fois que la résistance à la traction de la matrice est atteinte dans une section de l'éprouvette. A l'endroit de chaque fissure, le textile reprend les efforts en les transférant à la matrice de part et d'autre de la fissure. Ainsi, l'effort augmente, et une seconde fissure se produit dans la section de l'éprouvette où la résistance ultime de la matrice est de nouveau atteinte. La répétition de ce processus entraîne la formation de plusieurs fissures.
- (iii) Une troisième zone linéaire débutant à la fin de la zone de fissuration avec la stabilisation de la formation de fissure. Elle est généralement marquée par la reprise totale de l'effort par le textile. De plus, la rigidité de cette zone est bien similaire à celle du textile tout seul.
- (iv) Une quatrième zone, appelée phase post-pic, qui apparaît lorsque le textile se rompt ou lorsque la résistance à l'arrachement du textile de la matrice est atteinte au niveau des plaques de serrage.

Tableau 5. Propriétés mécaniques des composites FRCCM

	FRCM-ID	σ_{max} [MPa]	ε_{max} [%]	μ [%]	N	W [mm]	S [mm]
Lin-FRCM	FRCM.1L.FL	1.25	6.97	50.18	6	6.72	54.21
	Co.V [%]	1.12	1.22	1.12	7.69	2.76	4.44
	FRCM.2L.FL	3.52	6.31	70.51	8	2.69	42.32
	Co.V [%]	2.42	0.08	2.42	5.88	14.50	4.24
	FRCM.2L.FL.I	4.43	6.83	88.80	16	1.16	19.72
	Co.V [%]	2.20	1.50	2.20	2.88	8.56	5.91
	FRCM.2L.FL.F	4.42	6.21	88.67	15	0.93	21.05
	Co.V [%]	1.76	5.88	1.76	3.07	5.95	9.30
Carbone-FRCM	FRCM.1L.C	1.69	0.63	11.45	11	0.33	29.13
	Co.V [%]	8.25	2.98	8.25	4.16	14.35	5.49
	FRCM.2L.C	3.80	0.54	12.89	16	0.20	21.37
	Co.V [%]	3.58	5.76	3.58	3	6.34	8.17

σ_{max} : Résistance en traction, ε_{max} : Déformation maximale, μ [%] : Taux d'exploitation du textile, N : Nombre de fissures à σ_{max} , W : Largeur de fissure at σ_{max} , S : Espacement entre fissures à σ_{max}

Le **Tableau 5** récapitule quelques données expérimentales pouvant permettre une analyse critique de l'importance de l'interface textile-matrice dans le comportement mécanique d'un composite FRCCM.

Dans un premier temps, il est important de bien comprendre la mécanique de la fissuration. Les fissures dans un composite FRCCM, se produisent là où la déformation et la contrainte ultime de la matrice minérale sont atteintes. En analysant le comportement mécanique de la matrice et du textile après l'apparition de la première fissure, et en se basant sur le principe de redistribution de contrainte à l'interface, on peut dire que la déformation et la contrainte de la matrice à l'endroit de la fissure sont nulles (Saidi and Gabor, 2020), ce qui conduit à une augmentation soudaine de la déformation et de la contrainte du textile au niveau de cette fissure (Homoro et al., 2021; Saidi and Gabor, 2020). A l'apparition de la fissure, un endommagement de l'interface textile-matrice se produit (perte d'adhérence et glissement) sur une longueur communément appelée « longueur de décollement ou longueur de transfert de charge » notée δ_0 . Cet endommagement de l'interface est dû à la rétractation de la matrice et à l'allongement du textile au voisinage de la fissure. A l'endroit de la fissure, la contrainte appliquée à l'éprouvette est totalement supportée par le textile puis redistribuée du textile vers la matrice progressivement sur la distance δ_0 de part et d'autre de la position de la fissure. Par

conséquent, la contrainte et la déformation dans la matrice après fissuration augmentent tandis que la contrainte et la déformation supportées par le textile diminuent, résultant du transfert de charge du textile vers la matrice sur la longueur de décollement δ_0 au voisinage de la fissure. Au-delà de la longueur de transfert de charge ou longueur de décollement, la matrice et le textile se déforment suivant un même ordre de grandeur, ce qui traduit une adhérence parfaite à l'interface textile-matrice.

Cependant, sur la longueur $2\delta_0$ au voisinage d'une fissure, la déformation de la matrice reste inférieure par rapport au reste de la matrice. Par conséquent, avec une augmentation de la contrainte appliquée, la déformation ultime de la matrice ne sera atteinte que dans une zone en dehors de la zone de transfert de charge induite par les fissures précédentes. De ce fait, on peut donc noter que l'espacement entre fissures ne peut pas être inférieur à la longueur de décollement. De plus, il est important de noter que tant que l'espacement entre deux fissures adjacentes est supérieur à $2\delta_0$, une autre fissure peut se produire entre elles et ceci jusqu'à ce que l'espacement entre les fissures soit en dessous de $2\delta_0$. Ainsi, les deux longueurs de décollement des deux fissures se chevauchent et la déformation de la matrice ne peut plus atteindre sa valeur ultime pouvant déclencher sa fissuration à nouveau dans cette zone. Une fois que tout l'espacement entre deux fissures adjacentes dans la matrice devient inférieur à $2\delta_0$, aucune autre fissure ne peut apparaître, marquant ainsi la fin de la contribution de la matrice à supporter les efforts et le début de la troisième phase où les efforts sont entièrement supportés par le textile sans transmission à la matrice.

La préimprégnation du textile ainsi que l'ajout de fibres courtes de lin ont significativement influencé le comportement fissurant des composites FRCM. En particulier, les composites FRCM.2L.FL.I et FRCM.2L.FL.F ont développé un réseau de fissures beaucoup plus dense, avec respectivement 13 et 16 fissures, contre seulement 8 pour le composite de référence FRCM.2L.FL (Figure 12c). Parallèlement, l'ouverture des fissures a été fortement réduite dans les mêmes composites, atteignant 1.16 mm pour FRCM.2L.FL.I et 0.93 mm pour FRCM.2L.FL.F, comparativement à une ouverture de 2.69 mm pour FRCM.2L.FL (Tableau 5). Ces résultats soulignent l'efficacité des stratégies mises en œuvre pour améliorer l'adhérence à l'interface textile-matrice. En effet, la préimprégnation et l'incorporation de fibres courtes contribuent à limiter la propagation des fissures dans la matrice, en particulier au voisinage du textile, ce qui réduit le risque de dégradation prématurée. Des observations similaires ont été faites lors de l'augmentation du taux de renforcement, en passant d'une à deux couches de textile, aussi bien pour les composites Lin-FRCM que Carbone-FRCM. L'ajout d'une seconde couche de renfort textile améliore notablement les performances mécaniques, notamment en termes de contrainte maximale et de taux d'exploitation du textile. Les composites à deux couches ont ainsi montré une augmentation de la contrainte maximale allant jusqu'à 2.8 fois pour les Lin-FRCM, et 2.25 fois pour les Carbone-FRCM, par rapport à leurs homologues à une seule couche. Ces gains de performance peuvent être attribués à une redistribution plus homogène des efforts dans la matrice et à une réduction des concentrations locales de contraintes, favorisant un comportement mécanique plus stable et plus efficace.

Comme mentionné plus haut, l'espacement moyen entre les fissures ainsi que leur fréquence d'apparition sont directement liés à la longueur de décollement ou la longueur de transfert de charge entre le textile et la matrice. Les faibles valeurs d'espacement entre fissures enregistrées dans les composites FRCM.2L.FL.I et FRCM.2L.FL.F (Tableau 5) traduisent de faibles longueurs de décollement ou de transfert de charge, signifiant ainsi une meilleure interaction à l'interface textile-matrice comparativement au composite FRCM.2L.FL. De plus, la fréquence d'apparition et d'un grand nombre de fissures à des valeurs de déformation plus faibles (Figure 12a) ainsi que les faibles chutes de charges dans les composites FRCM.2L.FL.I et FRCM.2L.FL.F montrent aussi que la matrice se déforme moins au voisinage d'une fissure par rapport au composite FRCM.2L.FL, confirmant cette réduction de la longueur de décollement. En effet, plus l'adhérence textile-matrice est importante plus la longueur de transfert de charge du textile à la matrice est réduite (Homoro et al., 2021). Il est important de souligner l'action remarquable des fibres courtes dans le pontage des fissures et dans la création d'une continuité textile et matrice, augmentant ainsi les zones de frottement entre le textile et la matrice comme évoquer sur la phase de frottement dans le test d'arrachement.

Les propriétés physiques et mécaniques des textiles jouent un rôle fondamental dans la performance des composites FRCM. Les textiles en carbone et lin présentent des caractéristiques distinctes, ce qui influence leur adhérence à la matrice, leur taux d'exploitation et leur comportement mécanique global. 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 FRCM.2L.C avec des délaminations précoces. 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. À l'inverse, les textiles en lin, avec une structure rugueuse et une meilleure pénétrabilité de la matrice, offrent une exploitation supérieure, atteignant jusqu'à 70 % pour le FRCM.2L.FL. Le textile de lin, avec une densité de fils élevée (4.3/cm contre 1.33/cm pour le textile de carbone), favorise une répartition homogène des contraintes, ce qui confirme l'analyse de 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 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.

C. Adhérence FRCM-béton de chanvre : Essai de cisaillement simple tour

Les performances mécaniques des éprouvettes testées ont été évaluées en faisant les hypothèses suivantes pour permettre de faire une analyse comparative entre les données de cette campagne expérimentale :

- la section transversale des fils est constante pendant l'essai ;
- distribution uniforme des contraintes sur toute la surface de contact entre le FRCM et le bloc du béton de chanvre et sur les filaments individuels de chaque fil;
- l'allongement du textile non lié est uniforme sur toute la largeur ;
- le glissement du textile est uniforme sur toute la largeur du composite.

Les principaux résultats obtenus sont résumés dans le [Tableau 6](#) et représenté sur la [Figure 13](#) sous forme de courbe force-glissement du textile par rapport au substrat. Les paramètres du tableau sont définis comme suit :

- F_{max} est la force maximale de cisaillement
- σ_{max}^m est la contrainte maximale obtenue par le rapport de F_{max} sur la section transversale du FRCM (60x10 mm²)
- σ_{max}^t est la contrainte maximale obtenue par le rapport de F_{max} sur la section transversale du textile (5.616 mm²)
- τ_{max} est la résistance au cisaillement développée à l'interface FRCM/béton végétal, obtenue par le rapport de F_{max} sur la surface collée (Lxl)
- $g_{tex,max}$ est le glissement du textile par rapport au substrat, correspondant à F_{max}
- $g_{tex,rupt}$ est le glissement du textile par rapport au substrat, correspondant à $0.8 F_{max}$.

Tableau 6. Propriétés mécaniques de l'adhérence FRCM/béton de chanvre

ID-éprouvette	Longueur (L) collée [mm]	Largeur (l) collée [mm]	F_{max} [kN]	σ_{max}^m [MPa]	σ_{max}^t [MPa]	τ_{max} [MPa]	$g_{tex,max}$ [mm]	$g_{tex,rup}$ [mm]	Mode rupture
Bond_150_HC_1	150	60	1.06	1.76	187.86	0.12	5.6	5.81	
Bond_150_HC_2	150	60	1.12	1.86	198.54	0.12	5.52	6	Rupture du textile,
Bond_150_HC_3	150	60	0.98	1.63	174.54	0.11	4.77	5.09	fissure dans le
Moyenne	-	-	1.05	1.75	186.98	0.12	5.30	5.63	FRCM
Co.V [%]	-	-	6.67	6.41	6.43	4.95	8.64	8.52	
Bond_200_HC_1	200	60	1.1	1.83	196.05	0.09	5.94	6.21	
Bond_200_HC_2	200	60	1.1	1.84	196.05	0.09	5.7	5.86	Rupture du textile,
Bond_200_HC_3	200	60	0.97	1.62	173.22	0.08	5.01	5.34	fissure dans le
Moyenne	-	-	1.06	1.76	188.44	0.09	5.55	5.80	FRCM
Co.V [%]	-	-	7.10	7.01	6.99	6.66	8.70	7.54	

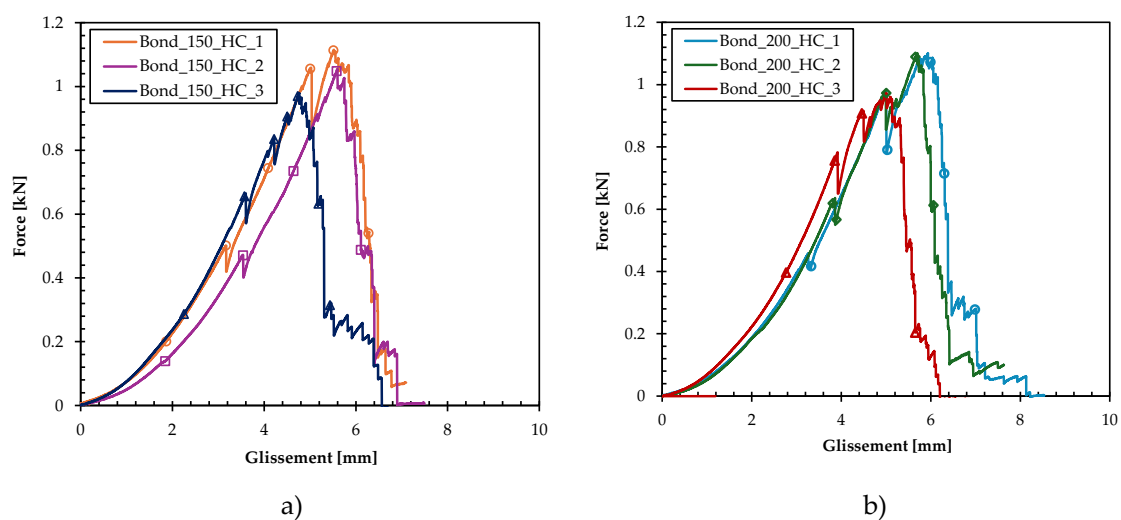


Figure 13. Courbes Force-glissement du textile : a) Bond_150_HC b) Bond_200_HC

Pour les deux longueurs de liaison étudiées, le glissement relatif du textile par rapport au substrat ainsi que la force maximale de cisaillement sont du même ordre de grandeur. Cette similarité des valeurs suggère que la longueur collée de 150 mm était déjà suffisante pour assurer un transfert de charge efficace entre le FRCM et le substrat. Par conséquent, cette longueur de 150 mm peut être qualifiée de « longueur de liaison effective ».

Cette observation est en accord avec les performances de composites similaires à base de chaux renforcés avec le même textile de lin. En effet, une longueur collée comprise entre 150 mm et 210 mm s'est révélée adéquate pour garantir une bonne adhérence du FRCM au substrat en maçonnerie. Il est également important de noter qu'aucun décollement à l'interface FRCM/substrat n'a été observé dans les deux configurations testées. Quelques fissures (Figure 14) sont apparues dans la matrice du FRCM à proximité de l'extrémité chargée, se propageant transversalement sur la couche supérieure de la matrice. Après l'apparition de ces fissures jusqu'à la charge maximale, la rupture de certains fils du textile a été constatée. De plus, un léger décollement à l'interface textile-matrice, observé près de l'extrémité chargée, a entraîné des pertes locales de contrainte. Ces ruptures localisées ont pu provoquer des redistributions partielles des contraintes dans les fils, limitant ainsi le taux d'exploitation des textiles à environ 70 %. Le mode de rupture observé peut être qualifié de rupture progressive du type FRCM, comme l'ont également souligné (Olivito et al., 2016), qui ont étudié l'application de FRCM de lin sur des substrats en maçonnerie. De même, (Trochoutsou et al., 2021b) ont évalué l'adhérence d'un FRCM de lin d'une longueur de 150 mm sur un substrat en maçonnerie, mettant en évidence une contrainte de

cisaillement d'environ 0.1 MPa, ce qui correspond aux résultats de la présente étude, où la résistance au cisaillement est comprise entre 0.1 et 0.12 MPa.

Ces résultats démontrent que les composites FRCM à base de textiles végétaux développés dans cette étude pourraient être envisagés pour des applications de renforcement du béton végétal, offrant ainsi une solution performante et durable dans le domaine de la construction.



Figure 14. Mode de rupture

D. Renforcement du béton végétal : Essai de compression diagonale

Les résultats des essais de compression diagonale effectués sur les mini-murs en béton de chanvre, à la fois non renforcés et renforcés par des composites FRCM, sont présentés sous forme de courbes force-déplacement vertical dans la Figure 15. Les différents modes de rupture observés au cours des essais sont illustrés dans la Figure 16. Les principaux paramètres permettant l'analyse sont également résumés dans le Tableau 7.

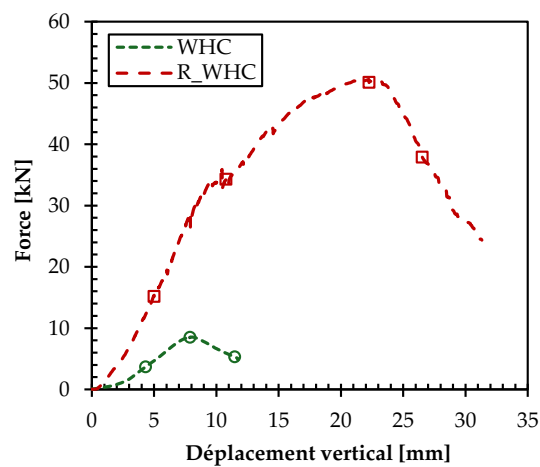


Figure 15. Courbes Force-déplacement du test de compression diagonale

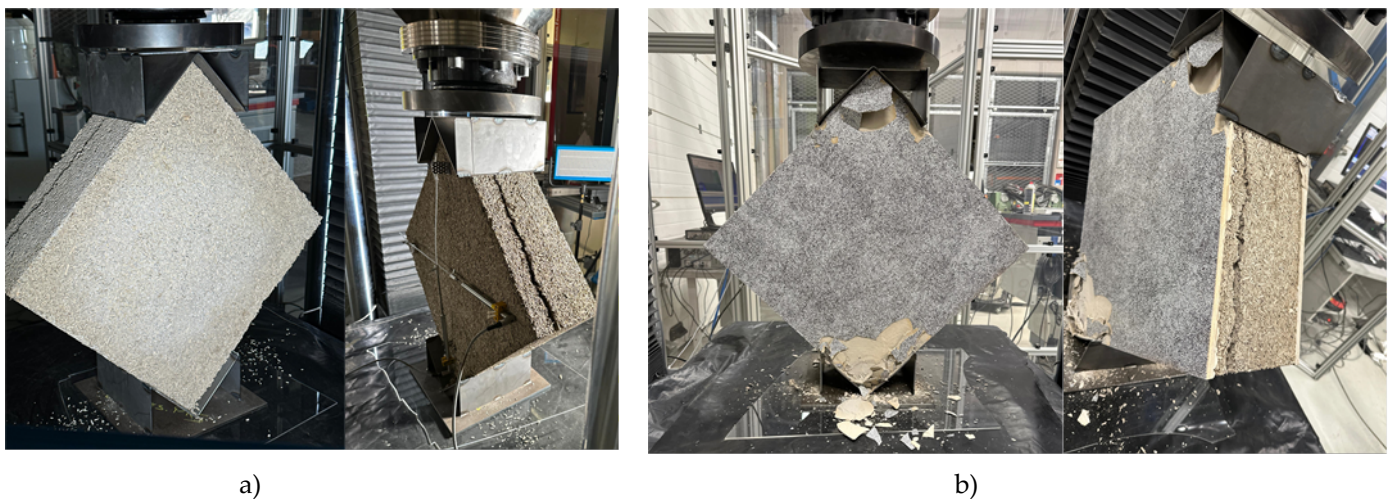


Figure 16. Mode de rupture : a) WHC b) R_WHC

Tableau 7. Propriétés mécaniques du test de renforcement du béton de chanvre

ID-échantillon	F_{max} [kN]	τ_{max} [MPa]	Y_{ela} [mm]	Y_u [mm]	μ
WHC	8.52	0.10	8.03	9.83	1.22
Co.V [%]	4.50	4.50	6.70	8.20	3.12
R_WHC	50.57	0.52	22.21	26.02	2.90
Co.V [%]	5.60	5.60	3.49	2.95	3.40

En absence des normes et recommandations aux matériaux biosourcés, la contrainte de cisaillement, τ_{max} , a été sous l'hypothèse de conditions de cisaillement pur au milieu du panneau, appliquée aux murs en maçonnerie dans (RILEM, n.d.), via l'équation (1).

$$\tau_{max} = 0.88 \frac{F_{max}}{A_0} \quad (1)$$

où, $A_0 = \frac{l+h}{2} e$ est la surface transversale nette de l'échantillon, l est la largeur, h est la hauteur, e est l'épaisseur totale de l'échantillon dans sa configuration non endommagée.

Le coefficient μ est le facteur de ductilité des différents échantillons, défini comme étant le rapport de la valeur du déplacement à l'état ultime (Y_u , correspondant à $0.8F_{max}$ dans la phase post-pic) à la valeur du déplacement (Y_{ela}) de la phase élastique.

Comme le montre la Figure 15, la courbe charge-déplacement des murs renforcés est caractérisée par trois phases distinctes :

- une première phase quasi-linéaire, correspondant au comportement élastique du matériau.
- Une deuxième phase marquant le début de l'endommagement, entraînant une diminution progressive de la rigidité.
- Une troisième phase adoucissante, avec une rupture progressive.

En revanche, les murs non renforcés présentent seulement deux phases : une phase linéaire suivie d'une phase adoucissante. Le renforcement des murs par des FRCM végétaux a permis une augmentation remarquable de la capacité de charge, atteignant environ 500 % par rapport aux murs de référence. L'application des composites FRCM influence non seulement la rigidité des murs, mais aussi leur capacité de dissipation d'énergie ainsi que leur mode de rupture. Cet aspect est fondamental pour améliorer les performances des murs en béton végétal face aux efforts de cisaillement. Ces améliorations mécaniques peuvent être attribuées aux bonnes performances en traction des textiles de lin et à leur capacité à reprendre les efforts. De plus, comme l'ont montré les essais d'adhérence FRCM/béton de chanvre dans la section précédente, ces résultats confirment l'efficacité des FRCM végétaux ainsi que leur compatibilité avec le béton végétal. Il est également important de noter qu'aucun décollement du FRCM n'a été observé. La rupture observée (Figure 16) se manifeste par une ouverture localisée dans

l'âme du béton de chanvre, résultant de l'interaction entre les particules de chènevotte et le liant minéral. Par ailleurs, les sabots de compression ont induit un effet de bord notable, avec un enfoncement partiel dans le matériau, phénomène peu courant dans les maçonneries traditionnelles plus denses et rigides. Cette observation souligne la nécessité de concevoir un dispositif d'essai mieux adapté aux spécificités mécaniques et structurales des matériaux biosourcés, afin d'évaluer plus représentativement leur comportement au cisaillement. Cependant, un aspect particulièrement intéressant de cette étude réside dans la capacité des murs renforcés en béton de chanvre à résister au cisaillement, montrant des performances comparables à celles des maçonneries conventionnelles ou de systèmes renforcés similaires. A titre de comparaison, la résistance au cisaillement mesurée est de 0.38 MPa pour les murs en maçonnerie classique, de 0.82 MPa pour les murs renforcés étudiés par (Ferrara et al., 2020) et de 0.52 MPa pour les mini-murs en béton de chanvre renforcés dans cette étude.

Généralement, ces résultats mettent en évidence le rôle clé des FRCM végétaux dans l'amélioration du comportement mécanique des murs en béton végétal, en augmentant significativement leur capacité de charge et leur résistance au cisaillement. L'absence de décollement du renfort et la rupture localisée dans l'âme du béton de chanvre confirment une bonne compatibilité entre le FRCM et le substrat, favorisant un transfert de charge efficace. Ainsi, ces composites apparaissent comme une solution prometteuse pour le renforcement structurel du béton végétal, offrant des performances comparables aux systèmes traditionnels tout en s'inscrivant dans une démarche de construction durable.

IV. CONCLUSION

Dans cette étude, l'efficacité des composites FRCM végétaux pour le renforcement des bétons de chanvre a été évaluée à travers une approche multi-échelles. L'objectif de cette campagne expérimentale est d'améliorer la faible résistance mécanique du béton végétal tout en garantissant une bonne compatibilité avec le renfort. Les principales conclusions suivantes peuvent être tirées :

- **Adhérence textile-matrice (Essai d'arrachement) :** L'étude a démontré que la préimprégnation des textiles de lin et l'ajout de fibres courtes de lin améliorent considérablement l'adhérence textile-matrice. Ces modifications réduisent la longueur de transfert de charge, augmentent la dissipation d'énergie et permettent une meilleure répartition des contraintes.
- **Comportement mécanique des composites FRCM (Essai de traction directe) :** Les résultats montrent que la rigidité et la capacité de résistance des composites sont influencées par l'adhésion textile-matrice. L'ajout de fibres courtes et la préimprégnation du textile favorisent la formation de fissures plus denses avec des largeurs réduites, améliorant ainsi la capacité du composite à reprendre les efforts et à retarder la rupture. Les textiles de lin, en particulier, offrent un bon équilibre entre flexibilité et résistance, contrairement aux textiles de carbone qui souffrent de délamination prématurée.
- **Adhérence FRCM-béton végétal (Essai de cisaillement simple tour) :** L'analyse a révélé qu'une longueur de liaison de 150 mm est suffisante pour assurer un transfert de charge optimal entre le FRCM et le béton de chanvre. Aucun décollement significatif n'a été observé, ce qui confirme la compatibilité du FRCM avec le substrat végétal. La résistance au cisaillement obtenue (0.1 à 0.12 MPa) est similaire à celle observée dans des études précédentes sur des FRCM appliqués à la maçonnerie.
- **Renforcement du béton végétal (Essai de compression diagonale sur les mini-murs en béton de chanvre) :** Le renforcement par FRCM végétaux a permis d'augmenter la capacité de charge des murs jusqu'à 500 % par rapport aux murs non renforcés, tout en améliorant leur résistance au cisaillement et leur ductilité. L'absence de décollement et l'observation d'une rupture progressive au sein du béton de chanvre confirment une bonne adhérence entre le renfort et le substrat. Ces performances rapprochent les murs en béton de chanvre renforcés de ceux en maçonnerie traditionnelle.

Les résultats de cette étude mettent en évidence le potentiel des composites FRCM à base de textiles végétaux pour le renforcement du béton végétal, en proposant une solution à la fois performante et

écologiquement viable. L'amélioration des performances mécaniques, associée à une bonne compatibilité entre les matériaux, ouvre des perspectives prometteuses pour le développement de solutions structurelles innovantes à faible impact environnemental dans le secteur de la construction. Cependant, la durabilité de ces matériaux biosourcés demeure une préoccupation majeure, notamment en raison de leur sensibilité aux environnements alcalins. Des recherches futures sont nécessaires pour approfondir la compréhension du comportement mécanique de ces systèmes de renfort, en particulier en évaluant leur durabilité sous diverses conditions environnementales (humidité, cycles de gel-dégel, exposition aux sels, etc.), ainsi que leur tenue à haute température.

REFERENCES

- 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>
- Bardouh, R., Homoro, O., Reboul, N., Saidi, M., Amziane, S., 2024. Enhancing bio-based concrete mechanical properties: a novel approach with composite sandwiches and confined cylinders. *Mater. Struct.* 57, 139. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02400-3>
- Donnini, J., Chiappini, G., Lancioni, G., Corinaldesi, V., 2019. Tensile behaviour of glass FRCM systems with fabrics' overlap: Experimental results and numerical modeling. *Compos. Struct.* 212, 398–411. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.053>
- 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. *Constr. Build. Mater.* 261, 120490. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120490>
- 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>
- Homoro, O., Baranger, T., Michel, M., 2021. 3D finite element modeling of yarn reinforced mineral matrix: Comparison of damage behavior with experimental data. *Compos. Struct.* 261, 113567. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113567>
- NF EN 196-1 [WWW Document], n.d. . Afnor Ed. URL <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-1961/methodes-dessais-des-ciments-partie-1-determination-des-resistances/fa184622/57803> (accessed 5.26.24).
- Olivito, R.S., Codispoti, R., Cevallos, O.A., 2016. Bond behavior of Flax-FRCM and PBO-FRCM composites applied on clay bricks: Experimental and theoretical study. *Compos. Struct.* 146, 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.03.004>
- Papanicolaou, C.G., Triantafillou, 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., Triantafillou, 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>
- Peled, A., Bentur, A., 2000. Geometrical characteristics and efficiency of textile fabrics for reinforcing cement composites. *Cem. Concr. Res.* 30, 781–790. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00239-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00239-8)
- RILEM, n.d. RILEM - Publications [WWW Document]. URL https://www.rilem.net/publication/publication/4?id_papier=4091 (accessed 1.28.25).
- 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 Appl. Sci. Manuf.* 135, 105961. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105961>
- Trochoutsou, N., Di Benedetti, M., Pilakoutas, K., Guadagnini, M., 2021a. Mechanical Characterisation of Flax and Jute Textile-Reinforced Mortars. *Constr. Build. Mater.* 271, 121564. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121564>
- Trochoutsou, N., Di Benedetti, M., Pilakoutas, K., Guadagnini, M., 2021b. Bond of Flax Textile-Reinforced Mortars to Masonry. *Constr. Build. Mater.* 284, 122849. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122849>