

Renforcement des murs en maçonnerie avec des composites TRM

Nadia Tarifa¹

¹LMDC, Université de Toulouse, INSA-UPS, Toulouse

RESUME En raison de leur faible résistance à la traction et de leur hétérogénéité, les murs en maçonnerie de briques sont vulnérables aux forces de cisaillement lors des séismes. Et, en raison de l'importance de la préservation des bâtiments anciens construits en briques, de nombreuses recherches ont été menées pour assurer leur durabilité. Ce type de mur a, ainsi, été renforcé par divers composites, avec des résultats plus ou moins convaincants. Et, c'est sur la base de ces résultats que nous avons décidé d'étudier la pertinence d'un renfort des murs par composites TRM, pour des chargements monotones ou cycliques. Nous présentons ci-dessous les principaux résultats des essais réalisés pour ce faire au LMDC de Toulouse.

Mots-clefs Maçonnerie, cisaillement, renforcement, réparation, TRM.

I. INTRODUCTION

Les constructions en maçonnerie de briques constituent à bien des égards des trésors culturels, artistiques, historiques et scientifiques. Des problèmes structurels (fissure de joints, fracture ou déchaussement de briques) peuvent survenir sur ces ouvrages en cas de charges excessives, tassement du sol, tremblements de terre ou action du vent (Gharib, 2015).

En effet, ces structures ont une capacité importante sous charges gravitaires, mais ne sont pas conçues pour résister aux charges horizontales, du fait de la faiblesse de leur capacité en cisaillement dans le plan. Il s'agit alors de savoir quelles méthodes peuvent être utilisées pour renforcer les murs en maçonnerie. La méthode de renfort la plus couramment utilisée consiste à coller des matériaux composites sur la surface extérieure des murs. Les polymères renforcés avec des fibres (FRP) sont d'un usage courant, en raison de leur légèreté et de leurs hautes performances mécaniques (Mukhtar and Faysal, 2018). Cependant, les FRP ne sont pas pleinement exploités lorsqu'ils sont appliqués à des matériaux à faible résistance à la traction et au cisaillement, tels que la maçonnerie. Ils souffrent par ailleurs des inconvénients des liants organiques : sensibilité aux températures élevées, application difficile dans des environnements humides et exposition des opérateurs aux émanations de composés organiques volatiles lors de la mise en œuvre. Les mortiers renforcés de fibres textiles (TRM ou TRC) permettent de surmonter ces limites grâce à une matrice inorganique compatible avec la maçonnerie, facile à appliquer, résistante au feu et durable (Babatunde, 2017; Kouris and Triantafillou, 2018; Papanicolaou et al., 2007).

C'est sur la base de tous ces résultats que nous avons débuté notre travail de recherche qui a comporté deux campagnes expérimentales. La première visant à étudier l'effet des TRM (textiles de verre E), de la configuration du renfort et du taux de renfort sur le comportement en cisaillement des murs. Ces travaux ont montré l'efficacité d'un renfort sur une seule face du mur, collé sur toute sa surface (Tarifa et al., 2023). En second lieu, l'effet de la taille des mailles, l'orientation des fils et l'effet de la matrice ont été investigués, c'est l'objet de cet article. Durant cette deuxième campagne, la réparation des murs préalablement fissurés a aussi été explorée. Ces objectifs ont conduit à effectuer une variété de tests de caractérisation des matériaux. Ensuite, afin d'évaluer la faisabilité et l'efficacité d'un tel renforcement sur des constructions historiques, des essais de compression-cisaillement sous chargement cyclique dans le plan ont été réalisés, dans l'optique d'approcher le plus possible les conditions aux limites d'un séisme.

II. MATERIAUX ET METHODES

1. Matériaux

Les briques de terre cuite de Toulouse, constitutives des murs, ont été fabriquées de façon traditionnelle, similaire à celle probablement utilisée depuis au moins 200 ans. Les murs étant carrés (1,3 m de côté), une rupture par cisaillement avec un mode de fissuration diagonale (avec glissement éventuel des joints) est attendue. La taille des briques (420×200×50 mm³) permet de maintenir un nombre représentatif de joints verticaux. Les proportions massiques du mélange de mortier de chaux utilisé sont de 1/4 chaux/sable avec un rapport eau/chaux de 0,55. Chaque mur en maçonnerie est réalisé selon un modèle d'assemblage courant avec des joints de mortier d'environ 15 mm d'épaisseur.

La chaux a été choisie comme matrice pour les composites en raison de sa porosité, qui permet d'éviter les problèmes de condensation dans le mur, et donc de sa compatibilité avec le substrat.

Différents textiles ont été utilisés (PZ700 **Petites Mailles**, verre AR **Grandes Mailles** et EQ Grid avec des fils multidirectionnels) (voir Figure 1 et Tableau 1).

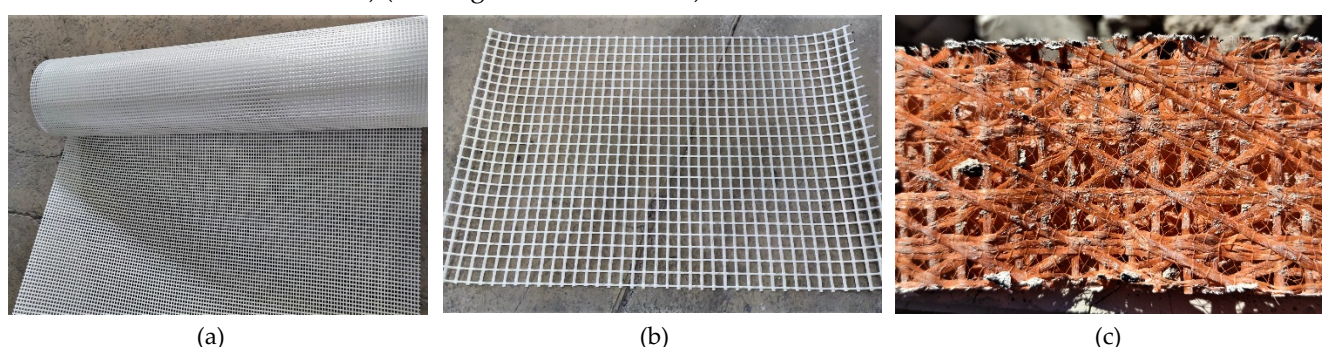


FIGURE 1: Textiles utilisés pour le renforcement : (a) PZ700 petites mailles, (b) verre AR grandes mailles, (c) EQ Grid multidirectionnel

TABLEAU 1: Propriétés des textiles

		Epaisseur (mm)	Taille de maille (mm)
PZ700 petites mailles	Chaîne	1.0	4.6
	Trame		5.5
Verre AR grandes mailles	Chaîne	2.13	28.3
	Trame		22.8
EQ Grid multidirectionnel	Chaîne	0.8	7
	Trame		20
	Diagonale		15

En plus de la **Chaux1** qui est très répandue sur le marché, une **Chaux2** a été utilisée pour étudier l'effet de la matrice sur le renforcement. Le Tableau 2 présente les propriétés des deux chaux utilisées pour le renforcement.

TABLEAU 2: Propriétés des chaux de renfort

	Granulométrie (mm)	Rc28 (MPa)	Cohésion (MPa)
Chaux 1	0-1.6	4.85	0.354
Chaux 2	0-1.2	14.00	0.893

Pour finir, deux murs ont été fissurés avec un essai de compression-cisaillement quasi-statique jusqu'à la rupture, puis réparés avec la **Chaux1** ou la **Chaux2** en utilisant le même textile pour les deux.

2. Méthodes

Le Tableau 3 synthétise les murs testés. Pour cette campagne, 7 murs ont été construits : Un mur témoin (MNR), 3 **Murs Renforcés** avec la chaux C1 et des textiles différents (MR-PM-C1, MR-GM-C1, MR-EQ-

C1), 1 mur avec un des trois textiles et la chaux C2 (MR-textile-C2), et deux murs fissurés puis réparés avec un des trois textiles et les deux chaux (MRé-textile-C1 et MRé-textile-C2).

Les murs ont été testés en compression-cisaillement sous chargement cyclique. Les essais sont ont été réalisés en déplacement horizontal (H) cyclique imposé selon la norme ASTM E2126-05 (E06 Committee, 2021). Chaque cycle bidirectionnel présente la même amplitude dans les deux directions et est répété deux fois. L'amplitude est accrue par pas de 1,5 mm tous les deux cycles, correspondant à l'amplitude du premier cycle, et une vitesse initiale de 0.04 mm/s qui augmente de 0.04 mm/s tous les deux cycles pour garder un temps constant par cycle. Une charge verticale (V) de confinement est appliquée d'une valeur de 75 kN simulant le poids équivalent à trois étages.

La Figure 2 illustre le banc de cisaillement utilisé pour les essais de compression-cisaillement. Pour la suite du document, les sens PUSH et PULL correspondent respectivement aux déplacements positifs et négatifs de la machine.

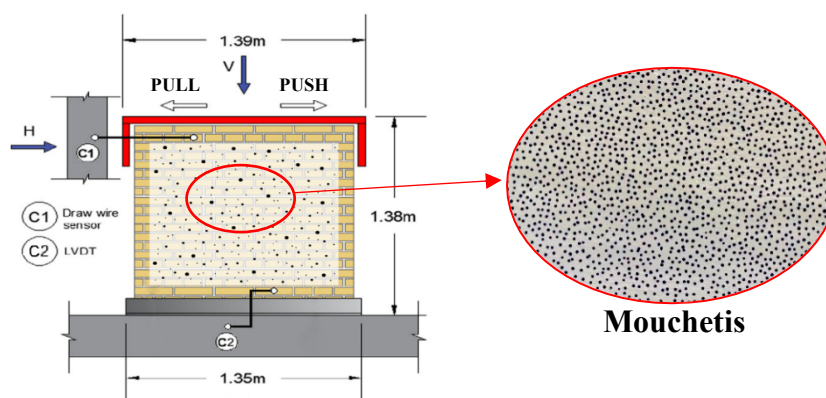


FIGURE 2: Dispositif expérimental pour les essais de compression-cisaillement

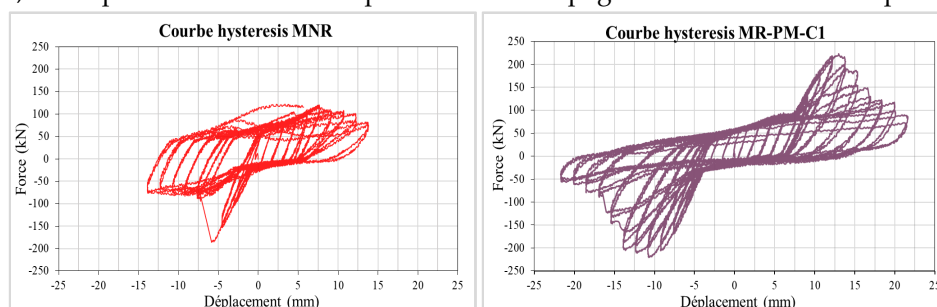
TABLEAU 3: Récapitulatif murs campagne expérimentale

Nom mur	Configuration
MNR	Mur non renforcé
MR-PM-C1	Mur renforcé avec le PZ700 petites mailles et la chaux C1
MR-GM-C1	Mur renforcé avec le verre AR grandes mailles et la chaux C1
MR-EQ-C1	Mur renforcé avec le EQ Grid multidirectionnel et la chaux C1
MR-textile-C2	Mur renforcé avec un textile choisi parmi les précédents et la chaux C2
MRé-textile-C1	Mur fissuré réparé avec un textile choisi parmi les précédents et la chaux C1
MRé-textile-C2	Mur fissuré réparé avec un textile choisi parmi les précédents et la chaux C2

III. RESULTATS

▪ Murs renforcés (effet du textile)

La figure 3 présente les courbes hystérésis des murs renforcés avec la Chaux 1 et la Figure 4-a présente les courbes enveloppes (force/déplacement) des essais cycliques. Seul un côté des courbes enveloppes est présenté, correspondant au sens de déplacement accompagnant la formation de la première fissure.



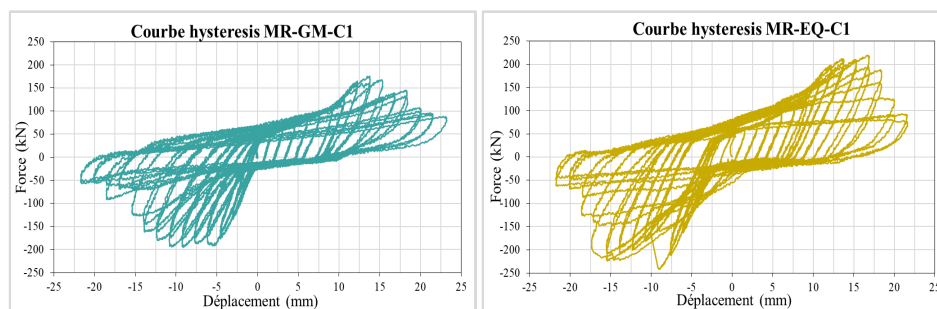


FIGURE 3: Courbes hystérésis murs renforcés Chaux 1

Pour ces quatre premiers murs, la première fissure est apparue dans le sens PULL (sens correspondant au déplacement négatif de la machine).

Initialement, tous les murs présentent un comportement élastique linéaire suivi d'un comportement non linéaire comme pour les murs testés dans la partie précédente. Malgré des rigidités similaires, la résistance au cisaillement est significativement différente.

Le Tableau 4 synthétise la force ultime (F_{max}), le déplacement au pic, les causes de rupture et l'énergie dissipée cumulée totale des différents murs.

La force ultime (F_{max}) atteinte par les murs renforcés est plus élevée que celle atteinte par le mur témoin (MNR), non renforcé, quel que soit le type de renforcement. La résistance au cisaillement augmente de 5% (MR-GM-C1) à 25% (MR-EQ-C1). L'augmentation apparente de la résistance au cisaillement peut s'expliquer par un transfert de charge approprié entre le TRM et le substrat qui a permis au renforcement de ponter les microfissures et les fissures.

Selon des observations globales (voir Figure 4-a et Tableau 4), le MNR a subi une fissure diagonale combinée à un glissement de joint. Ce dernier a continué à se déformer pendant quelques cycles après le pic en raison de l'effet du confinement que nous avons appliqué qui a généré une friction au niveau des fissures horizontales.

Les murs renforcés n'ont cédé qu'en raison de fissures diagonales, de fissures multiples dues au transfert de charge et au délaminage total ou partiel du renfort. Il a été observé qu'un renfort avec un textile à petite maille cède avec une délamination et un décollement quasi-total. L'augmentation de la taille des mailles n'accroît pas la force de cisaillement, mais contribue à la ductilité du mur et à éviter le décollement. Enfin, le textile de verre multidirectionnel est celui qui s'est le moins délaminé et qui a atteint la force de cisaillement la plus élevée. Tant que le renforcement est positionné et appliqué de manière à adhérer et à s'ancrer efficacement aux unités de briques, il reste tendu de part et d'autre des fissures, ce qui améliore globalement le confinement.

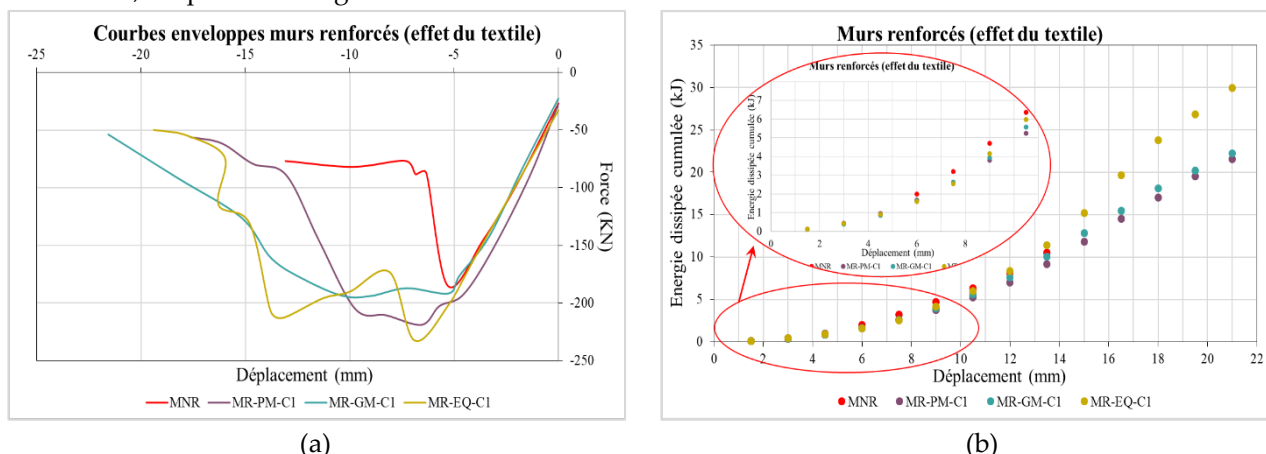


FIGURE 4: Courbes enveloppes (a) et Energie dissipée cumulée (b) des murs renforcés avec différents textiles

L'énergie dissipée au cours d'un cycle est définie comme l'aire inscrite dans la boucle de la courbe force-déplacement et est calculée à l'aide de la règle trapézoïdale. La Figure 4-b illustre l'énergie cumulée dissipée pour le MNR et les trois murs renforcés. Le principal mécanisme de dissipation de l'énergie est la fissuration (et le frottement au niveau des fissures horizontales s'il y en a).

Initialement, la dissipation d'énergie est produite par la fissuration de la maçonnerie. Une fois achevé le transfert de contrainte du substrat au système TRM, la capacité de dissipation peut également être fournie par la dégradation progressive du textile.

Pour de petits déplacements, le renforcement parvient à limiter les dommages à la maçonnerie, générant ainsi une moindre dissipation d'énergie. Il existe un déplacement (de l'ordre de 12 mm dans notre cas, voir Figure 4-b) au-delà duquel l'énergie dissipée cumulée d'un mur renforcé devient supérieure à l'énergie dissipée cumulée du mur non renforcé. Le phénomène de fissuration est donc retardé par rapport au comportement du MNR.

Le mur présentant la plus grande dissipation d'énergie cumulée est MR-EQ-C1.

Cette dissipation d'énergie pourrait s'expliquer par la disposition multidirectionnelle des fils du textile, permettant une adhérence efficace quelle que soit l'orientation des efforts de traction, et favorisant ainsi la multi-fissuration.

MR-PM-C1 présente l'énergie dissipée cumulative la plus faible, légèrement inférieure à MR-GM-C1. Cela peut signifier que l'augmentation de la taille de la maille a eu une faible influence sur l'énergie dissipée. Le textile qui a été retenu pour la suite est le EQ Grid.

TABLEAU 4: Synthèse des résultats des murs

Mur	Fmax (KN)	Déplacement au pic (mm)	Cause de rupture			E dissipée cumulée totale (KJ)
			Fissure diagonale	Glissement de joint	Délaminage du renfort	
MNR	185	5.26	x	x		10.5
MR-PM-C1	219 (+18%)	6.54	x		Total	21.5 (+105%)
MR-GM-C1	194 (+5%)	5.26	x		Partiel	22.2 (+111%)
MR-EQ-C1	232 (+25%)	6.90	x		Partiel	29.9 (+184%)

▪ Murs renforcés (effet de la matrice)

La figure 5 présente la courbe hystérésis du mur renforcé avec la Chaux 2 et le textile EQ Grid, et la Figure 6-a présente les courbes enveloppes (force/déplacement). Contrairement aux murs précédents, le mur MR-EQ-C2 montre une première fissure apparue dans le sens PUSH (sens à déplacement positif de la machine). Par la suite, la courbe enveloppe de ce mur sera représentée inversée de façon à pouvoir la superposer aux courbes des murs MNR et MR-EQ-C1 afin de les comparer.

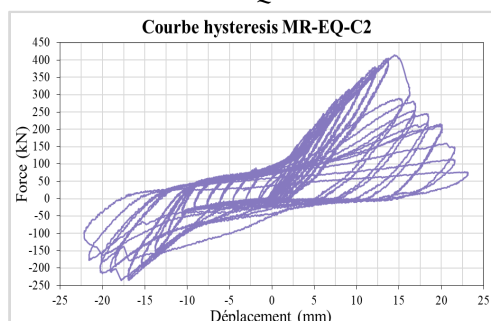


FIGURE 5: Courbe hystérésis du MR-EQ-C2

Comme pour les essais précédents, tous les murs présentent un comportement élastique linéaire suivi d'un comportement non linéaire. On peut voir que ni la chaux ni le textile n'interviennent dans cette première phase, qui est principalement gouvernée par le comportement de la maçonnerie.

Le Tableau 5 synthétise la force ultime (Fmax), le déplacement au pic, les causes de rupture et l'énergie dissipée cumulée totale des différents murs.

La charge ultime atteinte par les murs renforcés est significativement plus élevée que celle atteinte par le mur témoin, non renforcé, quel que soit le type de renforcement. La résistance au cisaillement augmente de 25% (MR-EQ-C1) à 110% (MR-EQ-C2).

Le mur MR-EQ-C2 atteint la charge la plus élevée (389 kN). Sa chaux constitutive C2, plus résistante et présentant une meilleure cohésion que la chaux C1, a permis en toute logique d'accroître la résistance du mur. Cependant la rupture de ce mur est plus fragile que celle du mur MR-EQ-C1. En effet, après dépassement du pic, la charge chute inexorablement, alors qu'elle est maintenue à un niveau important pour le mur MR-EQ-C1. Bien que présentant le déplacement au pic le plus élevé ce mur n'est donc pas le plus ductile.

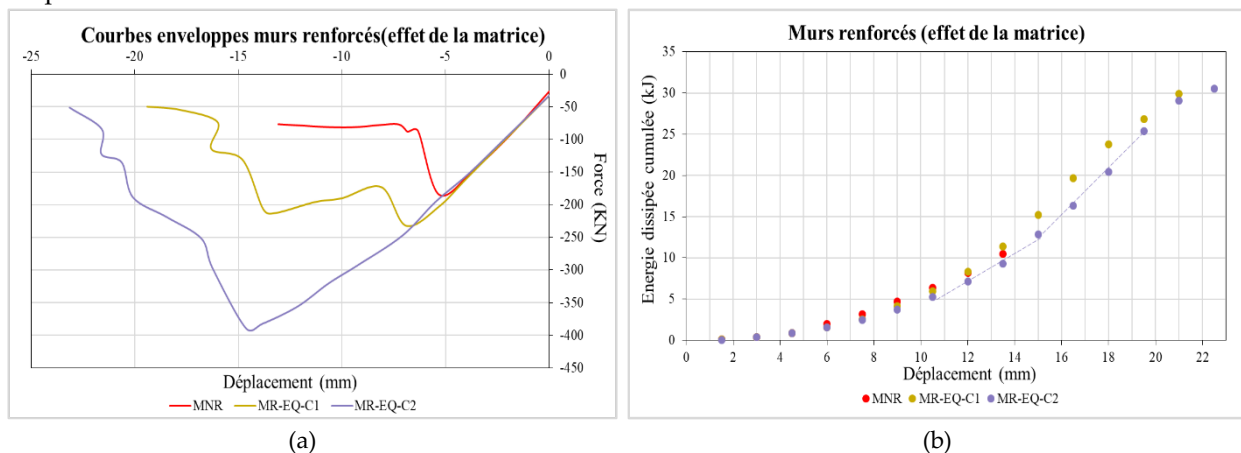


FIGURE 6: Courbes enveloppes (a) et Energie dissipée cumulée (b) des murs renforcés avec les deux chaux

La figure 6-b illustre l'énergie dissipée cumulée pour les trois murs testés.

Le mur présentant la plus grande dissipation d'énergie cumulée jusqu'à un déplacement de 21 mm est le mur MR-EQ-C1. Cette dissipation d'énergie pourrait s'expliquer par le fait que la chaux C1 se fissure davantage et dissipe plus d'énergie. La chaux C2 est plus rigide, ce qui est visible sur les premiers cycles où le mur MR-EQ-C2 dissipe moins d'énergie. Cette chaux limite davantage l'ouverture de fissure grâce à sa résistance et à son adhérence élevées ce qui contribue à une plus faible dissipation d'énergie. A partir du cycle 15 mm, la pente de l'énergie dissipée augmente considérablement (la chaux C1 montre une pente plus progressive).

TABLEAU 5: Synthèse des résultats des murs

Mur	Fmax (KN)	Déplacement au pic (mm)	Cause de rupture			E dissipée cumulée totale (KJ)
			Fissure diagonale	Glissement de joint	Délaminage du renfort	
MNR	185	5.26	x	x		10.5
MR-EQ-C1	232 (+25%)	6.90	x		Partiel	29.9 (+184%)
MR-EQ-C2	389 (+110%)	14.64	x		Partiel	30.5 (+190%)

▪ **Murs réparés (effet de la matrice)**

La figure 7 illustre les courbes hystérésis des deux murs réparés. La Figure 8-a présente les courbes enveloppes du MNR et des MRé-EQ-C1 et MRé-EQ-C2. Les murs réparés ont été fissurés dans le sens PUSH avant réparation, donc ils ont cassé dans le même sens que pendant l'essai cyclique.

Le Tableau 6 synthétise la force ultime (Fmax), le déplacement au pic, les causes de rupture et l'énergie dissipée cumulée totale des différents murs. La charge ultime atteinte par les murs réparés reste plus

élevée que celle atteinte par le mur témoin, non renforcé, quel que soit le type de chaux. La résistance au cisaillement augmente de 19 % (MRé-EQ-C1) à 58 % (MRé-EQ-C2).

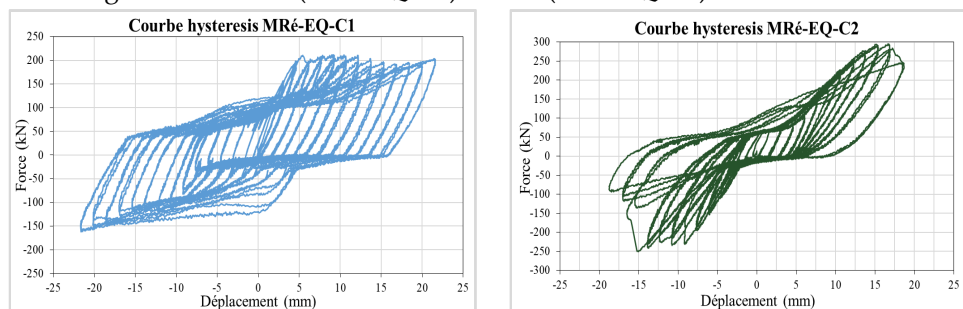


FIGURE 7: Courbes hystérésis murs réparés

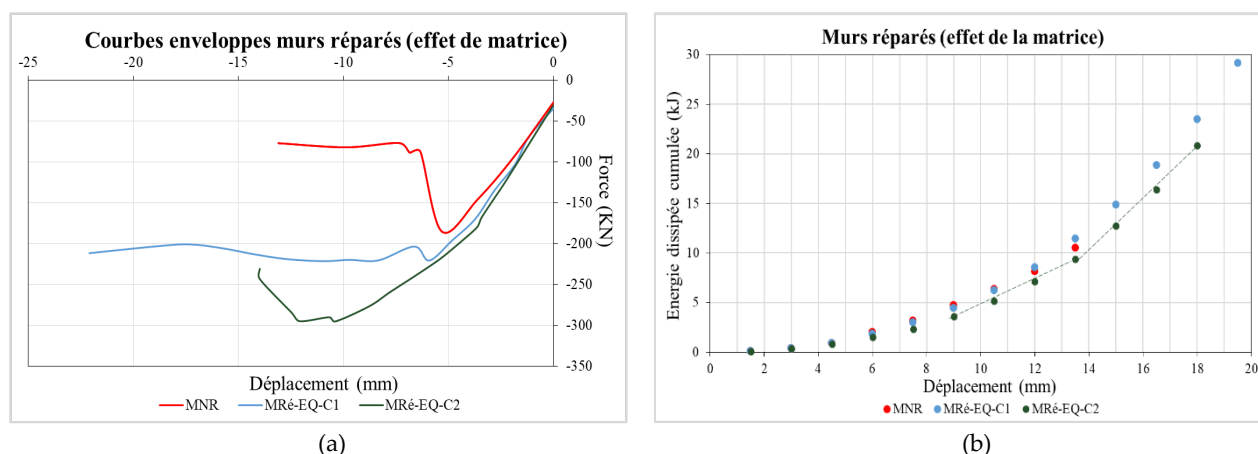


FIGURE 8: Courbes enveloppes (a) et Energie dissipée cumulée (b) des murs réparés

Comme pour les murs renforcés, la chaux C2 contribue à accroître la résistance du mur et en conséquence son déplacement au pic. Le comportement après le pic reste cependant fragile, accompagné d’une chute brutale de la force face alors qu’elle se stabilise pour le MRé-EQ-C1. La présence d’une fissure horizontale dans le mur MRé-EQ-C1 avant sa réparation a probablement permis de générer une friction importante pendant l’essai.

La figure 8-b illustre l’énergie dissipée cumulée pour les trois murs.

A partir du cycle 12 mm, le mur MRé-EQ-C1 dissipe plus d’énergie que le mur témoin, et au final, légèrement plus que le mur réparé avec la chaux C2. Cela confirme l’hypothèse faite plus haut : la chaux C1 se fissure plus que la chaux C2.

A partir du changement de pente qui correspond à l’endommagement pré-pic (déplacement de 12 mm), la pente de l’énergie dissipée associée à la chaux C2 est plus grande, car elle n’est pas encore rompue. Après rupture, l’absence de multi-fissuration ne permet pas à la chaux C2, à l’instar de la chaux C1, de maintenir une dissipation d’énergie aussi élevée que celle de la chaux C1.

TABLEAU 6: Synthèse des résultats des murs

Mur	Fmax (KN)	Déplacement au pic (mm)	Cause de rupture			E dissipée cumulée totale (KJ)
			Fissure diagonale	Glissement de joint	Délaminage du renfort	
MNR	185	5.26	x	x		10.5
MRé-EQ-C1	220 (+19%)	5.42	x	x	Partiel	29.2 (+177%)
MRé-EQ-C2	292 (+58%)	12.08	x		Partiel	20.9 (+98%)

IV. CONCLUSION

Les constructions en maçonnerie sont vulnérables aux forces horizontales et doivent donc être renforcées pour en assurer l'intégrité structurelle. La présente étude expérimentale s'est concentrée sur des murs de maçonnerie historiques renforcés par des composites TRM qui sont soumis à des essais monotones ou cycliques de cisaillement-compression combinés dans le plan. Les principaux résultats sont les suivants :

- Les murs cèdent principalement par rupture en cisaillement sous la traction diagonale (où le mur atteint sa résistance maximale), ce qui entraîne la délamination partielle ou totale du composite (à l'exception du mur témoin qui a aussi cédé sous le glissement de joint).
- Le renforcement par mortier renforcé de textile a contribué à l'homogénéité du comportement des murs renforcés.
- La taille des mailles intervient dans le mode de rupture des murs renforcés, plus la maille est petite plus le renforcement va avoir tendance à se décoller de la structure.
- Le textile multidirectionnel a montré les meilleures performances étant donnée l'orientation de ses fils qui a permis une meilleure adhérence et un meilleur comportement.
- La chaux intervient non seulement dans la ductilité du comportement des murs mais aussi dans la résistance au cisaillement. Plus la chaux est rigide et a une meilleure cohésion, plus elle va limiter l'ouverture de fissures jusqu'au pic. La résistance au cisaillement sera plus élevée, mais la rupture sera fragile.

Lors d'une opération de renforcement, le choix du textile et de la matrice de renfort dépend des performances recherchées, en particulier de la résistance et de la ductilité. L'étude réalisée apporte ainsi des éléments de référence pour la maîtrise d'œuvre de telles opérations.

REFERENCES

- Babatunde, S.A., 2017. Review of strengthening techniques for masonry using fiber reinforced polymers. *Composite Structures* 161, 246–255. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.132>
- E06 Committee, 2021. Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E2126-11>
- Gharib, T., 2015. Renforcement des structures historiques en maçonnerie par matériaux composites : application aux murs en pierres calcaires.
- Kouris, L.A.S., Triantafillou, T.C., 2018. State-of-the-art on strengthening of masonry structures with textile reinforced mortar (TRM). *Construction and Building Materials* 188, 1221–1233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.039>
- Mukhtar, F.M., Faysal, R.M., 2018. A review of test methods for studying the FRP-concrete interfacial bond behavior. *Construction and Building Materials* 169, 877–887. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.163>
- 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>.
- Tarifa, N., Djamaï, Z.I., Duprat, F., Soula, C., 2023. Influence of Textile Reinforcement on Masonry Walls Subjected to In-Plane Loads. *SJ* 120. <https://doi.org/10.14359/51737143>.