

Comportement des murs en maçonnerie renforcés avec des composites TRM

Nadia Tarifa¹, Zakaria Elyes Djamai¹, Frederic Duprat¹

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

RESUME Lors des tremblements de terre, les murs en maçonnerie de briques sont vulnérables aux forces de cisaillement et ce, principalement en raison de la faible résistance à la traction et de la grande hétérogénéité des matériaux constitutifs. De nombreuses recherches ont alors été menées sur le renforcement de ce type de mur, par différents composites, avec des résultats plus ou moins probants. Et c'est sur la base de ces résultats que nous avons choisi de tester la résistance aux forces de cisaillement de murs renforcés avec des composites TRM. Nous présentons dans ce qui suit les principaux résultats de ces tests effectués au sein du LMDC de Toulouse.

Mots-clefs Maçonnerie, renforcement, TRM, cisaillement.

I. INTRODUCTION

Les murs des bâtiments traditionnels construits en maçonnerie sont susceptibles de se dégrader en raison des charges qui prennent naissance dans le système de contreventement, s'ils y sont associés. 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 courante 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 [1], en raison de leur légèreté et de leurs hautes performances mécaniques. 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, et souffrent des inconvénients des liants organiques : sensibilité aux températures élevées, application difficile dans des conditions humides, impact environnemental solide et risques pour la santé des travailleurs. 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 [2-4].

Ce travail de recherche vise à étudier l'effet pour les TRM (textiles de verre E) de la configuration du renfort et du taux de renfort sur le comportement en cisaillement des murs, ce qui nous a conduits à effectuer une variété de tests qui comportent des essais de compression sur le mortier et les briques et des essais de flexion sur le mortier. Enfin, et afin d'évaluer la faisabilité et l'efficacité d'un tel renforcement sur des constructions historiques, des essais de traction sur les composites et des essais de compression-cisaillement quasi-statiques sur les murs ont été effectués.

II. MATERIAUX ET METHODES

1. Matériaux

Cinq murs de maçonnerie ont été construits avec des briques de terre cuite de Toulouse. Comme les murs sont carrés (de côté 1,3 m), on s'attend à une rupture par cisaillement avec un mode de fissuration diagonale (avec glissement éventuel des joints). La taille des briques ($420 \times 280 \times 50 \text{ mm}^3$) 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 de maçonnerie est posé selon un modèle d'assemblage courant avec des joints de mortier d'environ 15 mm d'épaisseur.

La chaux a été choisie à la place du ciment 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. Le composite est constitué d'une matrice de chaux renforcée par une ou deux couches de tissu textile bidirectionnel en verre E (PZ700). Ces composites ont été testés en traction pour leur caractérisation selon la recommandation RILEM [5]. En termes de performance mécanique, par comparaison aux composites à deux couches, les composites à une seule couche ont montré une ductilité plus élevée mais une résistance à la traction plus faible et une raideur moindre.

2. Méthodes

Un mur sans renfort a été testé comme référence (MNR). Le renforcement a été appliqué le long de la diagonale sur les deux faces du second mur (MX), et trois murs ont été renforcés extérieurement avec une ou deux couches appliquées sur une ou deux faces (M1F1C, M1F2C, M2F1C). Ces configurations couvrent les dispositions possibles de renfort : sur une ou deux faces du mur, et appliqué sur toute la surface ou seulement sur une bande diagonale.

Les murs ont été soumis un chargement monotone quasi-statique en compression-cisaillement. La force verticale (simulant le poids équivalent à trois étages) égale à 70 kN est appliquée progressivement et maintenue tout au long de l'essai. La force horizontale est appliquée par déplacement contrôlé (taux de 0,015 mm/s) pour mieux capturer le comportement post-pic.

III. RESULTATS

La figure 1 présente les courbes de la force horizontale en fonction du déplacement pour tous les essais. Pour l'ensemble des murs, on observe une phase élastique linéaire jusqu'à la force de cisaillement maximale, suivie d'un comportement non linéaire. L'intégrité des murs est préservée pendant cette première phase présentant une rigidité initiale presque identique pour tous les murs. Une deuxième phase non linéaire commence après la rupture partielle du mur et un déchargement soudain, qui diffère selon le type de mur et de renforcement. La non-linéarité peut être liée à l'endommagement d'un ou plusieurs composants de la maçonnerie, des matériaux de renforcement, voire de l'interface armature/bloc (ou joint de mortier). Dans cette deuxième phase, les murs présentent un comportement similaire mais avec une amplitude et une ductilité différente.

Quel que soit le type de renforcement, les murs renforcés atteignent une charge ultime nettement supérieure à celle du mur de référence. La résistance au cisaillement augmente de 57% (M1F1C) à 145% (MX). Un transfert de charge approprié substrat/TRM pourrait expliquer l'augmentation de la résistance au cisaillement, liée à la capacité du renforcement à ponter les microfissures et les fissures dans la première phase. Cette capacité est fournie par la courte longueur de transfert entre la matrice et le textile (identifiée expérimentalement lors des essais sur les composites, et estimée à 8 à 11 mm, et 6 à 8 mm (l'espacement des fissures représente environ 1,5 à 2 fois la longueur de transfert), respectivement pour 1 couche et 2 couches de renforcement, qui peut permettre un ancrage proche du renforcement de chaque côté d'une fissure, limitant ainsi sa croissance. D'autre part, la rigidité initiale est à peine affectée par le renforcement. Ceci peut être attribué à l'épaisseur des systèmes de renforcement (8 à 10 mm), beaucoup plus fine que celle des unités de briques.

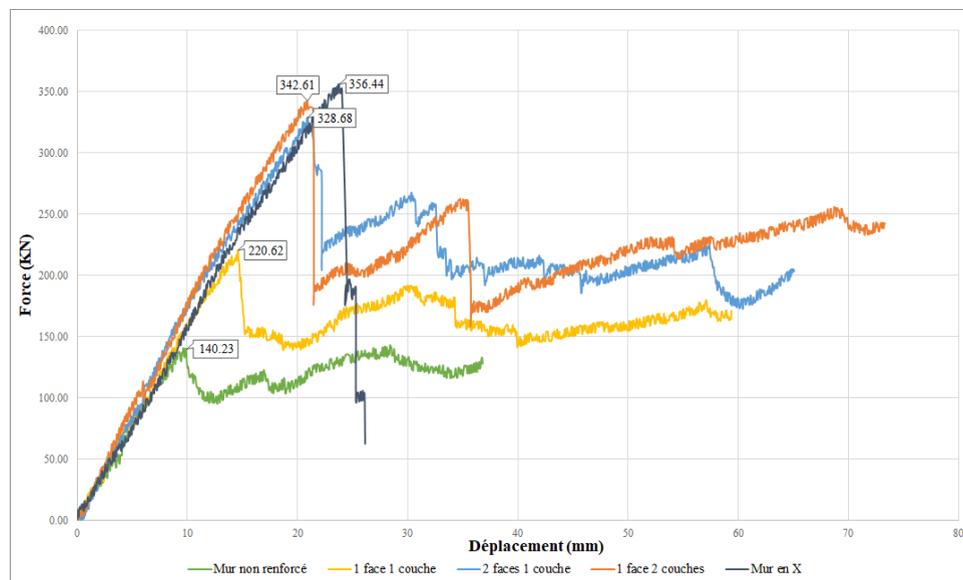


FIGURE 1: Comportement global des murs

Les observations indiquent que les dommages macroscopiques du mur sont considérablement retardés en termes de déplacement latéral. Le déplacement ultime est ainsi plus important pour les murs renforcés que pour le mur de référence (sauf pour MX). Le facteur de ductilité et l'énergie cumulée permettent de caractériser le potentiel des TRM comme renforts de maçonnerie. Afin de pouvoir comparer les résultats, l'énergie cumulée a été calculée pour un déplacement égal à trois fois le déplacement au pic. Les configurations adoptées sont concluantes (voir tableau 1), puisque des augmentations de l'ordre de 42 à 318% de l'énergie cumulée sont rapportées.

Le mur témoin (MNR, $F_{max}=140$ kN, $E_c=3176$ J) a péri par fissuration diagonale, combinée au glissement des joints. Après l'apparition de cette fissure, le mur a continué de résister en raison de l'effet de confinement vertical, induisant un frottement au niveau des fissures horizontales dans les joints. Le mur renforcé diagonalement (MX, $F_{max}=356$ kN, $E_c=4562$ J) présente dans son renfort textile un fil de chaîne orienté parallèlement à la diagonale tendue, ce qui donne une efficacité maximale au renforcement. En effet, la fissure principale en tension diagonale traverse à la fois les joints et les briques. Le flambage de la bande de renforcement le long de la diagonale comprimée

a accompagné la rupture brutale du mur, sans possibilité de capacité résiduelle. L'énergie cumulée est supérieure à celle du mur témoin.

L'énergie cumulée pour le mur renforcé par une couche sur une face (M1F1C, $F_{max}=220$ kN, $E_c=4514$ J) est proche de la précédente, mais ce mur présente une plus grande ductilité post-pic et montre notamment un regain de capacité résiduelle obtenu par friction le long de fissures horizontales. Le même mode de comportement post-pic s'observe pour les murs renforcés par deux couches sur une ou deux faces. Ainsi le mur M2F1C ($F_{max}=328$ kN, $E_c=12657$ J) a exhibé une grande ductilité et une augmentation considérable de sa résistance jusqu'à ce qu'une deuxième fissure se produise. Le mur M1F2C ($F_{max}=343$ kN, $E_c=13030$ J) a atteint le déplacement latéral le plus élevé au pic, et après deux défaillances importantes, sa résistance a continué d'augmenter, ce qui signifie que la contribution du renforcement au confinement s'est maintenue.

Les murs renforcés sur toute leur surface se rompent principalement en cisaillement sous l'effet de la tension diagonale qui induit la délamination progressive du renforcement TRM. La friction le long des fissures horizontales dans les joints de mortier contribue considérablement à la ductilité du comportement mécanique et dépend du confinement que procurent à la fois la charge verticale et le renfort textile, notamment par l'efficacité de son ancrage de part et d'autre des fissures.

IV. CONCLUSION

Les constructions en maçonnerie sont vulnérables aux forces horizontales et doivent donc être renforcées pour assurer leur 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 de cisaillement-compression combinés dans le plan. Les principaux résultats sont les suivants:

Les murs cèdent principalement par rupture en cisaillement sous la tension diagonale (où le mur atteint sa résistance maximale), ce qui entraîne la délamination du composite (à l'exception du mur témoin qui a cédé sous la tension diagonale et le glissement de joint).

- Le renforcement par mortier renforcé de textile a contribué à l'homogénéité du comportement des murs renforcés.
- L'augmentation du ratio de renforcement augmente non seulement la résistance mais aussi la ductilité globale de la structure.
- Si la résistance est recherchée, le renforcement sur les diagonales est préférable, et si la ductilité est recherchée, le renforcement sur toute la surface est préférable.

REFERENCES

- [1] Mukhtar FM, Faysal RM. A review of test methods for studying the FRP-concrete interfacial bond behavior. *Constr. Build Mater.* 2018;169:877–87. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.163>.
- [2] Kouris LAS, Triantafillou TC. State-of-the-art on strengthening of masonry structures with textile reinforced mortar (TRM). *Constr Build Mater* 2018;188: 122133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.039>.
- [3] Babatunde SA. Review of strengthening techniques for masonry using fiber reinforced polymers. *Compos Struct* 2017;161:24655.

- [4] Papanicolaou CG, Triantafillou TC, Karlos K, Papathanasiou M. Textile-reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in-plane cyclic loading. *Mater Struct* 2007;40:108197.
- [5] Ferrara, G.; Caggegi, C.; Gabor, A.; Martinelli, E. 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.* 2016, 49, 4923–4927.