
Analyse expérimentale du comportement au cisaillement des murs en maçonnerie de pierre renforcés par matériaux composites TRC & NSM FRP

T. Gharib¹, A. Gabor¹, E. Ferrier¹

¹ Laboratoire de Génie Civil et Ingénierie Environnementale (LGCIE), Site Bohr, Université Claude Bernard Lyon1, 82, bd Niels Bohr, Campus de la DOUA, 69 622 Villeurbanne Cedex

E-mail :

turath.gharib@etu.univ-lyon1.fr

aron.gabor@univ-lyon1.fr

Emmanuel.ferrier@univ-lyon1.fr

RÉSUMÉ.

Cette étude concerne l'étude du renforcement de structure en pierre par matériaux composites. Une première phase concerne la caractérisation des matériaux et l'analyse des comportements mécaniques de petits éléments de maçonnerie.

Les comportements en compression, sont déterminés pour des éprouvettes de maçonnerie soumis en compression uniaxiale perpendiculaires aux joints horizontaux. Les comportements de cisaillement de maçonnerie ont été étudiés sur des éprouvettes en deux échelles différentes. Le premier essai de cisaillement concerne un essai push-out. Le second concerne un essai de compression diagonale sur des murs carrés.

Le renforcement de la maçonnerie a été réalisé par deux techniques différentes. Pour le premier, il s'agit du renforcement par barres de FRP suivant la technique de NSM (near-surface mounted). Le deuxième est un renforcement par matrice cimentaire renforcé avec de textile TRC. Une comparaison des résultats de murs non renforcés et celles renforcés est menée. En fin, l'application de modèles analytiques a permis de comparer les résultats expérimentaux avec les résultats donnés avec les différents modèles.

ABSTRACT.

This study focus on the reinforcement of masonry structures with composite materials. The first part studies the characterisation of materials and the mechanical comportment of small elements of masonry.

The comportments of compression are defined on masonry specimens subjected to uniaxial compression which is perpendicular of the horizontals joints. The shear comportment of masonry has been studied on two different scales of specimens. The first shear test is the triplet test. The second is the diagonal compression of square walls.

The reinforcement of masonry is realised in two different techniques. The first is reinforcement avec FRP bars in the NSM (near-surface mounted) technique. The latter, utilise the TRC (textile reinforced concert). The experimental results of the non reinforced and reinforced walls are compared. At end, the application of analytical models has allowed to compare the experimental results with the analytical values given with the models.

MOTS-CLÉS : maçonnerie, TRC, NSM, push-out, compression diagonale, cisaillement.

KEYWORDS : masonry, TRC, NSM, triplet test, diagonal compression, shear.

1. Introduction

La maçonnerie présente un matériau composite anisotrope composé de rangés ou assemblages de pierres et mortier. Ces comportements mécaniques dépendent des caractéristiques des matériaux composants. Les structures en maçonnerie sont élaborées à partir de briques, pierres et en béton. Les comportements des maçonneries peuvent être étudiés à l'échelle locale (petits assemblage de matériaux) et à l'échelle globale (structure). Ces structures subissent des problèmes de dégradation de matériaux et aussi des problèmes structurels tels que le manque de stabilité, une discontinuité entre les éléments, un manque de ductilité. L'utilisation de matériaux composites pour le renforcement des maçonneries a été étudiée par plusieurs auteurs. Le renforcement par matériaux composites a l'avantage par rapport au renforcement traditionnel d'augmenter la résistance de la structure sans modifier son poids propre. Ces matériaux sont non corrosifs mais ils sont sensibles à la température. Le renforcement par TRC consiste à imprégner un textile (de fibre de verre, carbone, aramide) dans une matrice cimentaire et à l'appliquer sur la surface de l'élément structurel. Par ailleurs, le renforcement par NSM-FRP consiste à insérer des lamelles ou des barres de FRP dans une rainure effectuée sur la surface de la structure.

2. Caractérisation mécaniques de la maçonnerie

La résistance des maçonneries en compression est influencée par la résistance de compression de mortier, la résistance de traction de pierre, ainsi que de nombre de joints et les dimensions de l'éprouvette [EN 96]. En plus, les comportements en cisaillement des maçonneries sont influencés par la compression de la maçonnerie, la force de frottement, la cohésion entre pierre-mortier et la résistance de traction de pierre [ZIM 2012].

2.1. Caractérisation de matériaux composants : pierre et mortier et maçonnerie

Dans une première approche, une évaluation des caractéristiques mécaniques des pierres et du mortier utilisé pour construire la maçonnerie est effectuée. La pierre utilisée est une pierre calcaire dont la masse volumique est égale de 2,68 t/m³. Les pierres sont testées en compression uni-axiale. L'essai a donné une résistance moyenne de 95 MPa et un module élastique de 54279 MPa. De plus, le mortier utilisé est un mortier bâtard, constitué de ciment de chaux et de granulats. Des éprouvettes de 4x4x16 cm sont soumises à une flexion 3 points et chaque demi-prisme est testé par la suite en compression. La résistance moyenne en traction par flexion du mortier s'élève à 2,9 MPa et la résistance moyenne en compression est égale à 11,3 MPa. Le comportement en compression des maçonneries est étudié sur des éprouvettes prismatiques. Les éprouvettes prismatiques sont construites de trois pierres et contient deux joints horizontaux de 15 mm d'épaisseur. Le déplacement uni axiale de maçonnerie est mesuré avec un LVDT fixé sur la surface du spécimen. Le calcul du module de Young de la maçonnerie s'effectue dans la zone correspondant au 30% de la charge maximale. La résistance moyenne en compression de la maçonnerie est égale à 13,5 MPa et le module de Young vaut de 9630 MPa (Tableau 1).

Tableau 1. Compression de maçonnerie : valeur de résistance et de module élastique.

Matériau	Valeurs expérimentaux	
	Résistance de compression (MPa)	Module d'élasticité (MPa)
Pierre	95	54279
Mortier	11,3	18325
Maçonnerie	13,5	9630

2.2. Comportement au cisaillement de maçonnerie

La mesure de la résistance en cisaillement de la maçonnerie est effectuée avec l'essai de push-out, il consiste à appliquer des charges latérales au niveau des joints de mortier sur une éprouvette composée de trois pierres. Neuf spécimens sont testés en cisaillement à l'âge de 28 jours. Les éprouvettes ont des dimensions moyennes de 20 cm de hauteur, et 8 cm d'épaisseur. Les joints de mortier ont une épaisseur de 15 mm. L'existence de contrainte de compression a une influence sur la résistance de cisaillement. Les éprouvettes sont soumises à trois niveaux de confinement (0,2-0,6-1 MPa) appliquées sur les pierres d'extrémités. Les résultats (figure 1a) donnent une régression linéaire entre ($\sigma - \tau$) avec une valeur de cohésion de 0,3 MPa et un coefficient de frottement de 1,12 (Figure 1b). Ce résultat vérifie les valeurs données par [PAU 92] qui propose une valeur moyenne de cohésion égale de 3% de la résistance en compression, et une valeur de 0,3-1,2 pour le coefficient de frottement de la maçonnerie.

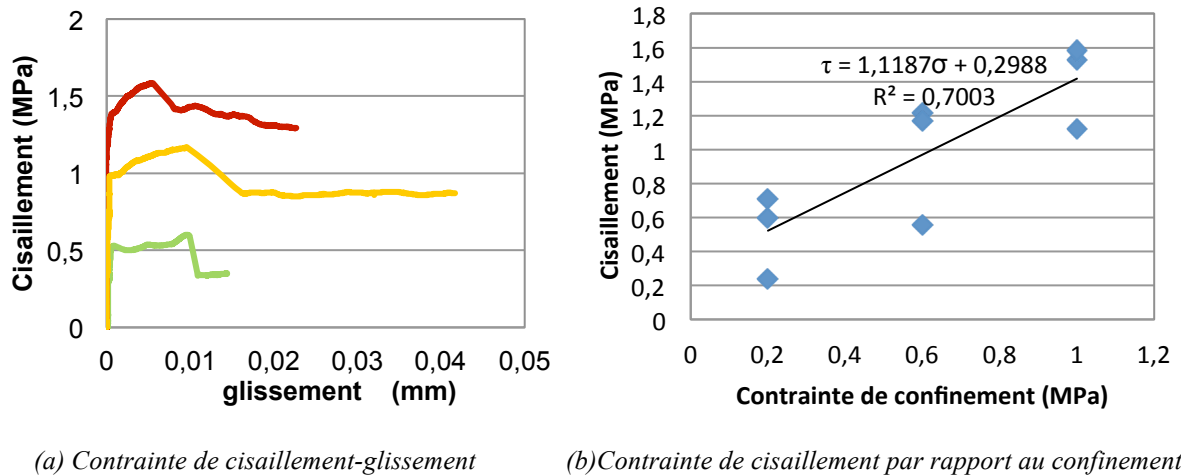


Figure 1. Cisaillement de maçonnerie : résultats expérimentaux.

3. Caractérisation de renforcement

3.1. Renforcement avec TRC : comportement mécanique et application

Le composite est un Textile de fibres (verre, carbone, acier, polypropylène, nylon) renforcé par matrice cimentaire. Le textile de fibres de verre UD a une masse surfacique de 430 g/m² et une géométrie de 8x10 mm (Figure 2). Une matrice cimentaire est utilisée avec une résistance en compression est 25 MPa et une résistance en traction par flexion de 6,8 MPa. Des plaques de TRC de largeur 52 mm et d'épaisseur de 4 mm sont testées en traction directe en parallèle de files résistantes à une vitesse de chargement de 0,3 mm / min (Figure 3). Le comportement de TRC testé en traction directe est présenté dans le Tableau 2.

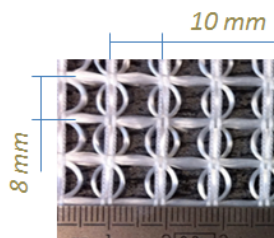


Figure 2. Géométrie de textile utilisé dans le TRC



Figure 3. Traction directe de plaques de TRC

Tableau 2. Traction directe de TRC : valeurs moyennes de résultats expérimentales.

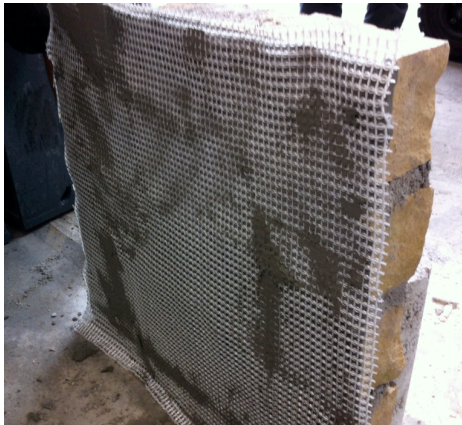
Valeurs moyennes caractéristiques de TRC	Contrainte (MPa)	F (KN/m)	ϵ_I (%)	ϵ_{II} (%)	ϵ_{III} (%)
	5,5	20,9	0,024	0,388	1,436

La technique de « stratification au contact » est définie selon [SCH 2012]. Il s'agit d'une technique d'application de TRC sur la surface de l'élément renforcé. Le renforcement par TRC est appliqué sur les murs en humidifiant la surface du mur, en appliquant une couche de mortier de granulats fins de 3 mm d'épaisseur. La couche de textile est appliquée sur la surface avec une pression permettant à la matrice de pénétrer dans le textile, une application d'une dernière couche de mortier est ensuite effectuée (Figure 4a). Le renforcement NSM FRP consiste à introduire une barre de FRP (Fibres Renforcées de Polymère) dans une rainure effectuée sur la surface de la structure renforcée. Le collage de la barre dans la rainure se réalise par un adhésif de polymère.

3.2. Renforcement avec NSM : comportement mécanique et application

Des barres de FRP de fibre de verre sont utilisées dans cette étude. Le diamètre de toutes les barres est de 6 mm. Les caractéristiques données par le fabricant montrent une résistance en traction de 938 MPa et un

module élastique égale de 52.5 GPa. La colle utilisée est une résine époxydique à deux composants. L'application de NSM est réalisée dans les étapes suivantes en effectuant une rainure sur la surface de mur dont la profondeur est la largeur correspondre au diamètre de bar [LOR 2007], puis en insérant la barre (Figure 4b).



(a) Application d'une couche de textile



(b) Insertion d'une barre de GFRP dans une rainure sur la surface du mur

Figure 4. Application de Renforcement.

4. Essai de compression diagonale

4.1. Programme expérimental

Les murs testés possèdent une longueur moyenne de 600 mm et une épaisseur de 85 mm. Chaque mur est composé de cinq rangés de pierres, chaque rangé est constituée de trois pierres. Les murs sont fixés sur les extrémités de la diagonale par deux supports métalliques ayant la forme d'un angle. Le chargement est appliqué par la base d'un vérin hydraulique de capacité de 500 KN. La vitesse de chargement est de 2mm/min. Les mesures de déplacement (d'allongement et de compression) se sont effectuées par deux capteurs de déplacement LVDT fixés sur les deux diagonales. Un capteur de déplacement laser est également utilisé pour la mesure des déplacements globaux verticaux. Le renforcement est effectué sur les deux côtés de chaque mur afin d'éviter les déformations hors plan.

4.2. Résultats expérimentaux

Le comportement en cisaillement des murs est étudié en force et en déplacement afin d'évaluer la résistance et la ductilité ainsi que le mode de rupture correspondant à chaque cas de renforcement. La résistance diagonale de la maçonnerie τ_{dt} correspond à une charge maximale P_{max} appliquée sur la surface latérale A_n et se calcule avec l'équation [1]. La ductilité en cisaillement est définie par l'équation [2], il s'agit du rapport entre les déformations ultime γ_u et élastique γ_e . L_c, L_t sont les longueurs des diagonales comprimées et allongées, et $\Delta L_c, \Delta L_t$ sont respectivement la variation de longueur de ces diagonales.

$$\tau_{dt} = \frac{P_{max}}{\sqrt{2} A_n} = 0.707 \frac{P_{max}}{A_n} \quad [1]$$

$$\mu_y = \frac{\gamma_u}{\gamma_e} \quad [2] \quad \gamma = \frac{\Delta L_c}{L_c} + \left| \frac{\Delta L_t}{L_t} \right| \quad [3]$$

4.2.1. Comportement des murs non renforcés

La valeur expérimentale de la résistance moyenne de cisaillement est calculée pour les trois murs. La résistance a une valeur de 1,26 MPa correspondant à une force moyenne de 89,4 KN. La rupture des murs non renforcé s'est produite par fissuration de joints horizontaux et verticaux. La résistance au cisaillement de la maçonnerie correspondant à ce mode de rupture et il est donné par l'équation [5]. Le calcul de résistance du mur non renforcé se réalise selon le mode de rupture [BAB 2013], [Li 2005], [SIL 2008] et [PET 2009].

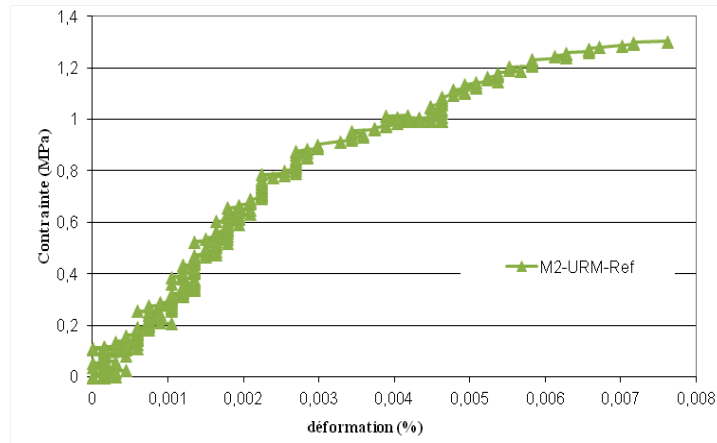


Figure 5. Compression diagonale : contrainte de cisaillement-déformation du mur non renforcés

- Rupture par glissement le long du joint horizontal [4].

$$V_{URM} = (\tau_0 + \mu \cdot \sigma_n) A_n = \frac{\tau_0}{(1 - \mu \cdot \tan\theta)} A_n \quad [4]$$

μ , τ_0 sont les paramètres définis par l'essai de cisaillement. Li et al proposent une valeur de 0,3 pour μ . Tandis que dans l'application de ce modèle μ utilisé est égale à 0,4. Cette valeur de μ est proposée par [EN-1052-3]

- Rupture par frottement de joints : Fissuration dans les joints en forme d'escalier [5].

$$V_{URM} = (\tau_0^* + \mu^* \cdot \sigma_n) A_n = \frac{\tau_0^*}{(1 - \mu^* \cdot \tan\theta)} A_n \quad [5]$$

τ_0^* , μ^* sont les paramètres de cisaillement globaux, calculés à partir de paramètres de cisaillement locale et en fonction de la structuration de mur et les dimensions de pierres d , b dans le mur.

- Fissuration diagonale des pierres [6].

$$V_{URM} = \frac{f'_{tb}}{2.3} \sqrt{1 + \frac{\sigma_n}{f'_{tb}}} A_n = \frac{\tan\theta + \sqrt{21.16 + \tan^2\theta}}{10.58} f'_{tb} \cdot A_n \quad [6]$$

- Rupture par compression de pierre [7].

$$V_{URM} = (f'_m - \sigma_n) \frac{2d}{3b} \cdot A_n = \frac{3df'_m}{3b + 2d \cdot \tan\theta} \cdot A_n \quad [7]$$

L'angle θ représente l'angle entre la force appliqué et les joints horizontaux de mur. $\tan\theta = \tan 45 = 1$. Les dimensions de mur t_m , h_m , b_m la résistance de compression de maçonnerie est f'_m

$$A_n = \frac{(L_m + H_m)}{2} * t_m \quad [8]$$

σ_n Représente la contrainte de compression de la maçonnerie. Alors que f'_m , f'_{tb} sont les coefficients liés à la résistance en compression et en traction de la maçonnerie, respectivement. La norme [ACI 2013] prend un facteur de 0.8 pour le calcul de la force.

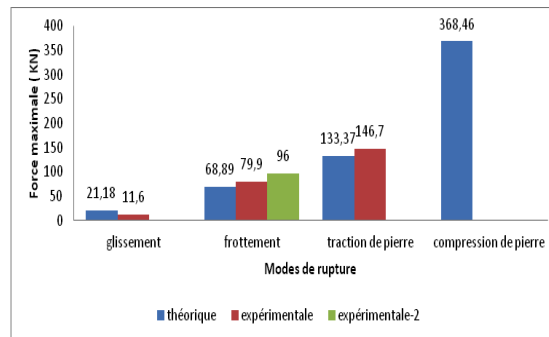


Figure 5. Compression diagonale : Valeurs analytiques et expérimentales

Tableau 2. Compression diagonale : Résistance de cisaillement des murs non renforcés

Nom	Force expérimentale (KN)	Résistance calculé selon le mode de rupture (KN)				Force calculée =0,8F analytique (ACI)	Rapport expérimentale / calcul
		Glissement de joints	Frottement de joints	Fissuration diagonale des blocques	Rupture par compression de pierre		
M1-URM-Ref	11,6	21,18	-	-	-	11,84	0,69
M2-URM-Ref	96	-	68,9	-	-	55,12	1,74
M3-URM-Ref	79,9	-	68,9	-	-	55,12	1,45
M4-URM-Ref	146,7	-	-	133,37	-	106,7	1,38
	-	-	-	-	368,46	294,77	-
moyenne	83,55	-	-	-	-	-	-
Ecart-type	55,78	-	-	-	-	-	-

4.2.2. Comportement des murs renforcés avec TRC

L'influence de la direction des fils de textile par rapport aux joints horizontaux ainsi que l'influence du nombre de couches de textile dans le TRC sont étudiées. L'augmentation de la résistance apportée avec le TRC est considérée vis-à-vis du cisaillement. Le calcul de la résistance en cisaillement est mené en se basant sur [ACI 2013]. Les formules présentées ci-dessous calculent la résistance apportée avec le renforcement seulement. La résistance de cisaillement nominale apportée par le renfort doit être inférieure à 50% de la résistance de mur non renforcé.

$$V_f = 2 \cdot (A_f \cdot f_{fv}) \cdot L_m \leq 0.5 \cdot V_m \quad [9]$$

Cette équation exprime la force de traction de renfort par une unité de largeur $A_f \cdot f_{fv}$ qui sont transmise vers le mur sur les deux côtés $2 \cdot L_w$. f_{fv} est la résistance de traction de « design » du TRC calculée à partir de la déformation de design ε_{fv} et le module de Young du textile E_f .

$$f_{fv} = \varepsilon_{fv} \cdot E_f \text{ et } \varepsilon_{fv} = \min(\varepsilon_{fd}, 0.004) \quad [10]$$

ε_{fd} Représente la déformation de traction du textile. Le module d'élasticité est égal à 74 GPa, et les déformations ultimes sont égales à 0,004. La surface de section est égale à 82,7 mm²/m.

4.2.3. Comportement des murs renforcés avec NSM GFRP

L'influence de la direction de barres par rapport aux joints horizontaux ainsi que l'influence du nombre de barres sont étudiées. L'augmentation de la résistance apportée avec le NSM GFRP est calculée en se basant sur [ACI 2013]. La résistance au cisaillement nominal apportée par le renfort est donnée par l'équation 11.

$$V_f = p_{fv} \frac{d_v}{s_f} \text{ et } d_v = \min(H, L) \quad [11]$$

s_f Représente la distance entre les barres de renforcement qui doit être prise égale à la distance entre les joints horizontaux.

$$p_{fv} = A_{f,barre} f_{fe} \leq 44500 \text{ N/barre pour NSM FRP} \quad [12]$$

p_{fv} Représente la force que chaque barre de GFRP transmet à la structure. La résistance calculée du mur renforcé par NSM et FRP doit être inférieure à la force maximale qui produit une rupture par écrasement de la pierre dans un mur non renforcé.

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \text{ et } \varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu}^* \leq C_E \varepsilon_{fu}^* \quad [13]$$

C_E Est un facteur de réduction environnementale compris entre 0.5 et 0.75 pour les fibres de verre. k_v Représente un coefficient de réduction de l'adhérence dans le cas de rupture par cisaillement. Ce coefficient dépend de l'index de renforcement ω_f .

$$k_v = \begin{cases} 0.4 & \text{pour } \omega_f \leq 0.20 \\ 0.64 - 1.2\omega_f & \text{pour } 0.20 < \omega_f \leq 0.45 \text{ et } \omega_f = \frac{1}{85} \frac{A_f E_f}{A_n \sqrt{f'_m}} \\ 0.10 & \text{pour } \omega_f > 0.45 \end{cases} \quad [14]$$

Tableau 3. Compression diagonale : Résistance de cisaillement des murs renforcés avec TRC & NSM

Nom de mur	Résistance expérimentale du mur (KN)	Résistance du mur de référence (KN)	Augmentation de la résistance apportée par le renfort		Rapport expérimentale / Analytique	Ductilité μ
			Résistance expérimentale du TRC & NSM	ACI (KN)		
				Force analytique-cisaillement		
M5-TRC-1CH	161,1	96	65,1	18,82	3,5	19
M6-TRC-1CH	35,6	11,6	24,0	18,82	1,28	91
M7-TRC-2CH	129,7	79,9	41,7	37,64	1,11	36
M8-TRC-2CV	77,8	11,6	66,2	37,64	1,75	79
M9-TRC-1CH-1CV	172,1	79,9	92,2	37,64	2,45	-
M10-TRC-1C-1D	127,6	96	31,6	8,58	3,68	1,5
M11-TRC-1C-2D	146,4	96	50,4	17,16	2,94	5,5
M12-NSM-2B-H-P	119,8	96	31,85	20,28	1,58	3,3
M13-NSM-2B-H-J	111,8	96	23,85	20,28	1,18	10
M14-NSM-4B-H-J	94,13	79,9	6,18	12,28	0,50	62
M15-NSM-1B-V	44,1	11,6	32,5	7,85	4,14	23
M16-NSM-1B-V	94,63	79,9	6,68	7,85	0,85	6,5
M17-NSM-2B-V	97,6	11,6	86	20,00	4,30	14
M18-NSM-2B-V	125,06	79,9	37,11	20,00	1,86	60
M19-NSM-1B-D	134,7	96	46,75	7,85	5,96	21

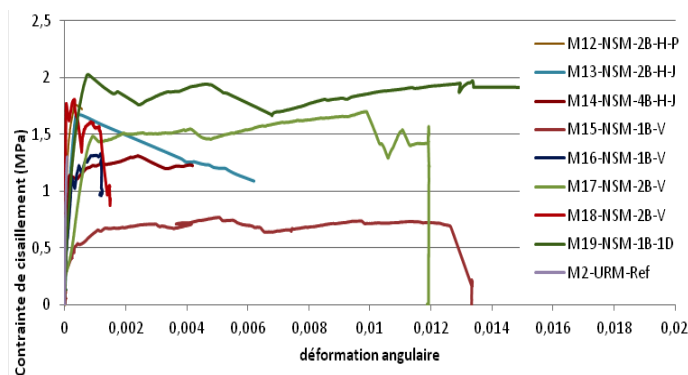


Figure 7. Compression diagonale : Comportement au cisaillement des murs renforcés avec NSM

5. Conclusion

Le renforcement sur toute la surface par une seule couche de textile a augmenté la résistance de mur. L'utilisation de deux couches de files horizontales n'a pas augmenté la résistance par rapport à celle de mur renforcé avec une seule couche. L'augmentation du nombre de couche de renforcement en cisaillement est plus efficace lorsque les fibres a des angles de 0-90°. Le mur renforcé avec une bande de textile sur la diagonale allongée présentent une augmentation de la résistance mais un comportement moins ductile. Le renforcement de deux diagonales (comprimé et allongé) n'augmente pas significativement la résistance par rapport au mur renforcé sur la diagonale allongée. Le renforcement de deux diagonales a amélioré la réponse ductile du mur. Le renforcement avec une seule barre diagonale a permis au mur d'avoir une résistance maximale et un déplacement de compression plus élevé. Le renforcement de chaque joint avec deux barres n'a pas augmenté la résistance par rapport au renforcement avec une seule barre dans le joint. Le renforcement horizontal par des barres qui traversent la pierre a donné la même résistance que celle de mur renforcé chaque les deux joints. Par contre, le mur est moins ductile alors que sa rigidité élastique est moins élevée. De l'autre côté, l'utilisation d'une seul barre vertical sur chaque côté n'a pas augmenté la résistance maximale mais elle a amélioré la ductilité des murs. Le renforcement par deux barres verticales a augmenté la résistance et la ductilité. Le renforcement par deux barres verticales a permis de répartir le renforcement sur une large zone de la section de mur, et d'empêcher l'ouverture des fissures horizontales.

6. Bibliographie

[ACI 2013] *Guide to design and construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures*, ACI 549.4R-1, Farmington Hills, USA, 2013

[BAB 2013] Babaeidarabad S. Masonry Walls Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composite Subjected to In-Plane and Out-of-Plane Load, Thèse de doctorat, University of Miami, 2013.

[CNR 2004] *Guide for the design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures*, Rome, CNR-Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, 2004

[EN 96] Eurocode 6: Design of masonry structures—part 1-1: common rules for reinforced and unreinforced masonry structures, 2006.

[EN-1052-3] Methods of test for masonry—part 3: determination of initial shear strength, 2007.

[Li 2005] Li, T., Galati, N., Tumialan, J.G., and Nanni, A. «Analysis of unreinforced masonry concrete walls strengthened with glass fiber-reinforced polymer bars». *ACI Structural Journal*. vol.102, n°4, 2005, 569–577.

[LOR 2007] Lorenzis L. De, Teng J.G. «Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures» *Composites Part B* 38, 2007, p.119–143

[PAU 92] Paulay, T. & Priestley, M.J.N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Building*, New York, United States, John Wiley & Son, 1992.

[PET 2009] Petersen, R. In-plane shear behavior of unreinforced masonry panels strengthened with fiber reinforced polymer Thèse de doctorat, School of Engineering, The Univ. of Newcastle, Newcastle, New South Wales, 2009.

[SCH 2012] Schladitz F., Frenzel M., Ehlig D., Curbach M. «Bending load capacity of reinforced concrete slabs strengthened with textile reinforced concrete» *Engineering Structures* No.40 , 2012, p. 317–326

[SIL 2008] Silva, P.F., Yu, P., and Nanni, A. « Monte carlo simulation for validating the in plane shear capacity of URM walls strengthened with GFRP grid reinforced polyurea». *Journal of Composites for Construction*, Vol. 12, 2008. No. 4, 405–415.

[ZIM 2012] Zimmermann, T., Strauss, A., & Bergmeiste, K. « Structural behavior of low- and normal-strength interface mortar of masonry ». *Materials and Structures* , 2012, p. 45:829–839.