
Comportement mécanique d'un enduit projeté sur son support pour la réhabilitation thermique des bâtiments - expérimentations à l'échelle d'un mur

Mathieu Eymard¹, Pascal Perrotin¹, Jean-Patrick Plassiard¹ et Stéphane Le Fay²

¹ LOCIE, Polytech' Annecy-Chambéry, 73376 Le Bourget du Lac.

² Société Parexgroup, 38 rue du Montmurier, 38070 Saint Quentin Fallavier.

RÉSUMÉ. Cette étude traite du comportement mécanique d'une solution d'isolation par l'extérieur pour la réhabilitation thermique des bâtiments. L'étude présentée est réalisée à l'échelle d'un volume élémentaire représentatif (V.E.R.) de mur. La solution d'isolation est constituée d'un enduit présentant de meilleures performances thermiques que les isolants les plus efficaces se trouvant sur le marché actuellement. Il est appliqué par projection d'une couche de 4 cm d'épaisseur sur la surface extérieure d'une structure. Ce matériau est réalisé à partir de l'aérogel de silice. Sa composition en fait un matériau poreux avec une faible résistance mécanique ainsi qu'un faible module d'Young, en comparaison d'enduits classiques. Par conséquent, le comportement mécanique de l'association structure/enduit est peu prédictible. Ce papier concerne l'étude expérimentale d'un mur maçonné recouvert de cette solution d'isolation et soumis à des sollicitations de cisaillement dans son plan. Parmi les phénomènes à approfondir, il y a une meilleure connaissance de la fissuration de l'enduit et le décollement par rapport à son support. La technique de corrélation d'images a été utilisée pour obtenir un champ de déplacement.

ABSTRACT. This paper investigates the mechanical behaviour, at the scale of a representative elementary volume of a wall, of a solution of a thick thermal insulation from the outside for refurbishment. This thermal insulating solution shows higher thermal performance than the current most effective solutions on the market. It is pneumatically placed from the outside with a 4 cm layer and based upon the silica aerogel material. Due to its composition, this material is porous with a weak mechanical strength and Young modulus in comparison of more classical coatings. Therefore, the mechanical behaviour of the association structure/coating is not predictable. This paper concerns the mechanical behaviour of a masonry wall coated with this insulation layer and submitted to shear sollicitations on its plane. Several phenomena have to be analysed, among them, a better knowledge of the coating's cracking behaviour and debonding on its structural base. The image correlation technique has been used to observ displacement fields.

MOTS-CLÉS : maçonnerie, briques, enduit isolant, cisaillement, expérimental, corrélation d'images.

KEYWORDS: masonry, bricks, insulating coating, shear, experimental, image correlation.

1. Introduction

Cette étude se place dans un contexte de réhabilitation thermique des bâtiments. D'après [IBR 14a], l'ajout d'une couche d'enduit isolant projeté directement sur la surface extérieure de la structure porteuse peut être une solution intéressante du point de vue de l'inertie thermique du bâtiment et pour la rupture des ponts thermiques. Le matériau étudié (ISO) s'apparente à un mortier léger (environ 300 kg/m^3) composé d'un liant minéral et de granules à base d'aérogel de silice. Il est prévu pour être appliqué sur une épaisseur de 4 cm. Sa conductivité thermique est de $0,027 \text{ W/(m.K)}$, d'après [IBR 14b].

Mécaniquement, cette configuration pose tout d'abord le problème de l'étude de l'interface entre ces deux matériaux. En effet c'est par celle-ci que vont transiter les efforts venant de la structure porteuse. Ainsi, une précédente étude a permis l'analyse, à l'échelle locale, de l'accroche entre cet enduit d'isolation thermique et son support structural [EYM 15]. Un des objectifs de précédents travaux était de déterminer le critère de rupture de l'interface enduit/support en utilisant l'essai Slant-shear. Ces résultats ont également permis de comparer son comportement mécanique avec un enduit de finition utilisé plus classiquement (MGF). Le tableau 1 regroupe les caractéristiques mécaniques intrinsèques moyennes des enduits utilisés : leur résistance à la compression σ_c , à la traction σ_t et leur module d'Young E . Ces résultats ont été obtenus par essais de flexion 3 points et de compression sur des éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$.

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques intrinsèques moyennes des enduits testés.

Enduits	σ_c (kPa)	σ_t (kPa)	E (MPa)
ISO	110	70	5
MGF	2900	1300	300

Afin d'étudier le comportement mécanique de ce complexe enduit/support pour des sollicitations représentatives du comportement en conditions réelles, une étude expérimentale a été effectuée à l'échelle d'un mur et est décrite dans ce papier. Elle concerne l'étude de six murs maçonnés réalisés à partir de briques en terre cuite alvéolées fournies par la société Wienerberger.

2. Bibliographie

Les maçonneries ont pour principale caractéristique une aptitude à reprendre des charges verticales. Cependant, les sollicitations horizontales restent préjudiciables, notamment dans le cas d'actions sismiques. Les études de maçonneries soumises à du cisaillement sont donc très présentes dans la littérature. La Figure 1 présente les trois principaux types d'essais retrouvés dans la littérature pour l'étude du comportement au cisaillement dans le plan d'une maçonnerie.

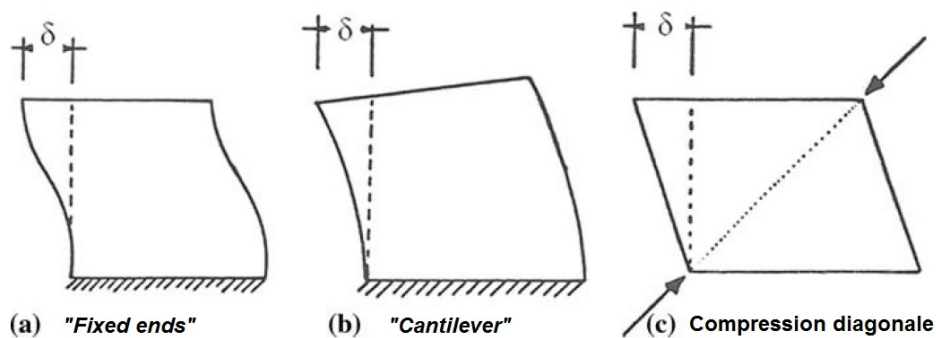


Figure 1. Représentation schématique des différents types d'essais pour solliciter une maçonnerie au cisaillement dans son plan, d'après [ICB 87]

Le premier (Figure 1, (a)) consiste à tout d'abord appliquer un effort vertical de pré-charge dont l'objectif est de simuler la présence d'une toiture et/ou d'étages supérieurs. L'horizontalité de la partie supérieure du mur est ensuite maintenue avant l'application du déplacement horizontal en partie supérieure, jusqu'à la rupture. Cet essai

est également appelé "Fixed ends test". Les essais réalisés par [RAI 92] et [VER 93] ont souvent été repris dans la littérature comme base de travail pour une analyse numérique. Le deuxième type (Figure 1, (b)) est semblable au premier mais dans cette version, l'effort de pré-chargement vertical est maintenu constant durant l'application de l'effort horizontal. Cet essai est généralement appelé mur "Cantilever". Le troisième (Figure 1, (c)) est un essai de compression diagonale provoquant des sollicitations de traction perpendiculairement à la diagonale comprimée, cette sollicitation étant représentative de la fissuration diagonale pouvant apparaître au sein des briques d'une maçonnerie soumise à du cisaillement, mais sans effort normal.

Afin de reproduire le plus fidèlement les conditions existantes au sein d'une structure réelle, l'essai "Cantilever" a été choisi. En effet, cet essai permet, par principe, un chargement vertical constant lors de sollicitation horizontale. Son utilisation répandue a permis de mettre en évidence les principaux paramètres influents à prendre en considération pour cet essai. Premièrement, d'après [HAA 09], le comportement d'une maçonnerie est complexe du fait de la présence de plans de faiblesse le long des joints verticaux et horizontaux. De plus, l'application d'un effort horizontal sur un mur préalablement chargé verticalement entraîne une mise en flexion du mur, combinée à des sollicitations de cisaillement. Lorsqu'une maçonnerie est soumise à de la flexion, des fissures horizontales apparaissent à l'interface brique-mortier dues à la faible résistance à la traction des plans de joint de la maçonnerie. D'après l'auteur, ces fissures ne représentent qu'un mode de rupture intermédiaire et local. En effet, la rupture globale du mur ne se développe pas dans ces conditions. Ces fissures réduisant la section résistante soumise à la compression, elles provoquent une concentration de contraintes de compression et une rupture du mur par compression au coin inférieur opposé à la sollicitation horizontale. En effet, la rupture est généralement située en partie inférieure des bâtiments, là où la rigidité est la plus importante, du fait des conditions limites fixes représentées par le sol. [TOM 09] et [TOM 12] ont réalisé des essais sur des maçonneries en briques de terre cuite alvéolées sous chargement vertical constant et soumises à un déplacement horizontal cyclique. Leurs travaux montrent que si les contraintes de compression sont faibles et que les joints sont de mauvaise qualité, un glissement d'une partie du mur au niveau d'un joint horizontal peut intervenir. Ce type de rupture est généralement observé en partie supérieure de bâtiments maçonnés, où les efforts de compression sont faibles et l'accélération liée aux sollicitations sismiques, forte. On ne l'observe que rarement en partie basse où généralement, la fissuration diagonale prédomine sous ce type de sollicitations. Le pré chargement vertical a donc une influence importante sur le mode de rupture de la maçonnerie. De plus, l'augmentation de l'effort vertical entraîne également une augmentation de la résistance au cisaillement de la maçonnerie, ainsi qu'une augmentation de la rigidité, en début d'essai, lors de la phase élastique. Par conséquent, pour ce type d'essai, l'effort de pré-compression vertical de la maçonnerie a une incidence sur le mode de rupture de la maçonnerie.

Le principal objectif de cette étude expérimentale est donc d'analyser le comportement d'une maçonnerie, non renforcée et recouverte de l'enduit d'isolation thermique, lorsque celle-ci est soumise à des efforts de cisaillement dans son plan.

3. Expérimentations

3.1. Réalisation des éprouvettes

Les maçonneries testées sont constituées de briques en terre cuite alvéolées, référencées GFR20 et fournies par la société Wienerberger et ont pour dimensions 500 mm de longueur, 299 mm de hauteur et 200 mm d'épaisseur. En comparant la masse volumique apparente sèche (620 kg/m^3) et la masse volumique absolue sèche (1500 kg/m^3) on déduit que le volume des alvéoles représente 59% du volume apparent de la brique. Les données du fabricant mettent en évidence une résistance moyenne en compression perpendiculairement à la face de pose de 8 MPa. Les deux faces de pose sont rectifiées (planéité de 0,5 mm) pour pouvoir être assemblées avec un mortier de joint mince. Le mortier considéré ici est de classe M10 et a été utilisé pour réaliser les joints horizontaux. Six maçonneries ont été montées par des professionnels de la société Wienerberger afin d'assurer un montage correct et de considérer deux mêmes échantillons comme identiques, afin de favoriser la reproductibilité des résultats. Chaque mur a pour dimensions 1,5 m x 1,5 m pour 0,20 m d'épaisseur. Parmi les six éprouvettes réalisées, deux maçonneries non enduites (notées B1 et B2) ont été considérées comme références pour cette étude. Deux éprouvettes recouvertes de l'enduit classique (MGF) ont été référencées B3 et B4. Enfin, deux éprouvettes recouvertes de l'enduit isolant (ISO) ont été référencées B6 et B7. Pour conserver la symétrie des éprouvettes, les deux faces ont été enduites.

Afin de se placer dans une logique de réhabilitation des bâtiments, qu'elle soit thermique ou structurelle, les joints verticaux de la maçonnerie n'ont pas été remplis. L'enduit isolant (ISO) a été appliqué en deux passes pour

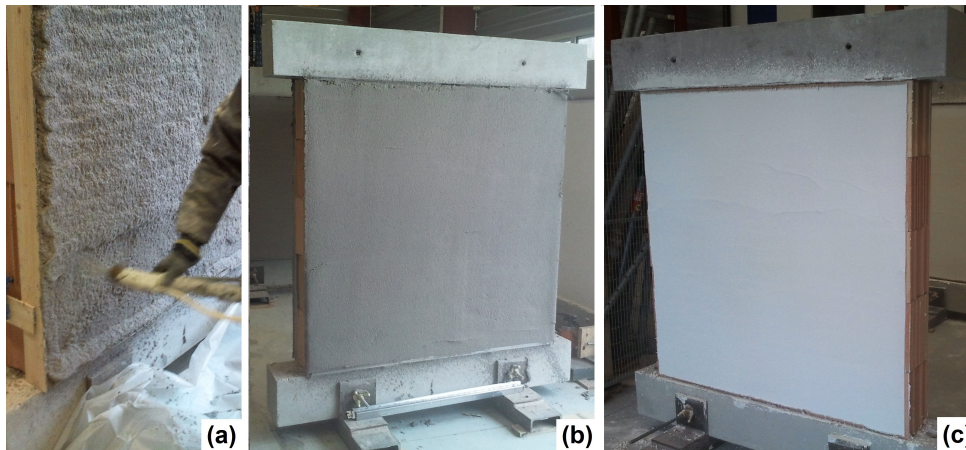


Figure 2. Application de la couche d'enduit isolant (a); maçonnerie recouverte d'enduit isolant (b) et d'enduit MGF (c).

une épaisseur finale de 4 cm. L'enduit de référence (MGF) a lui été appliqué en une passe pour une épaisseur de 1 cm, conformément à son utilisation usuelle.

3.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué d'un châssis en acier. L'inertie des poutres et poteaux qui le constituent est équivalente à celle d'une poutre HEB400. La figure 3 permet de visualiser un mur nu positionné sur le châssis, avant l'essai. La poutre inférieure en béton est maintenue au châssis par des mors de serrage (CLI1) qui permettent le blocage et le centrage hors plan de l'éprouvette sur le châssis. Un appui latéral (CLI2) permet d'éviter son glissement dans le plan lors de l'application de l'effort horizontal. Enfin, cette poutre est également maintenue avec des tirants verticaux à droite (CLI3) pour éviter un soulèvement lié à une rotation solide du mur lors du chargement horizontal. Les capteurs de déplacements M1 et M2 servent à vérifier l'efficacité de CLI3 et CLI2, respectivement. Les déplacements mesurés par le capteur M3 ont été utilisés pour vérifier la pertinence des mesures réalisées par corrélation d'images. Concernant la poutre supérieure en béton, son déplacement horizontal dans le plan est assuré par un système de roulements à rouleaux (CLS1). La poutre acier UPN300 (CLS2) est utilisée (avec les rouleaux (CLS1)) pour la répartition de la pré-charge verticale.

Deux vérins électriques (VE1 et VE2 d'une capacité de 120 kN chacun) sont utilisés pour l'application de la pré-charge verticale. Cet effort est appliqué globalement à une vitesse de 1 kN/s par paliers de 10 kN, jusqu'à l'application d'un effort total de 200 kN. Cette pré-charge verticale est proche des configurations testées par [TOM 12] et où les auteurs obtiennent des ruptures de maçonneries au cisaillement. Ce niveau de compression est également proche de celui d'un bâtiment R+2. Un pilotage en effort étant effectué sur ces deux vérins, la valeur de consigne de 202 kN a pu être maintenue tout au long de l'essai. Ensuite, un déplacement horizontal est appliqué en tête de mur par l'intermédiaire d'un vérin hydraulique (VH) de 300 kN, à une vitesse de 1 mm/min, par paliers de 1 mm, jusqu'à rupture. Tous les vérins possèdent un appui rotulé.

Le système de corrélation d'images est quant à lui présenté à la section 5 de cette étude, en même temps que les résultats obtenus avec cette technique de mesures.

4. Résultats expérimentaux

4.1. Observations générales

Les essais réalisés montrent tout d'abord une bonne stabilité des résultats obtenus. Premièrement, l'effort vertical appliqué par VE1 et VE2 demeure bien constant durant toute l'application de l'effort horizontal. De plus, les capteurs de déplacements M1 et M2 montrent un faible déplacement vertical de la poutre inférieure (valeur maximale moyenne : 0,26 mm) ainsi qu'un faible glissement de celle-ci (valeur maximale moyenne : 0,50 mm),

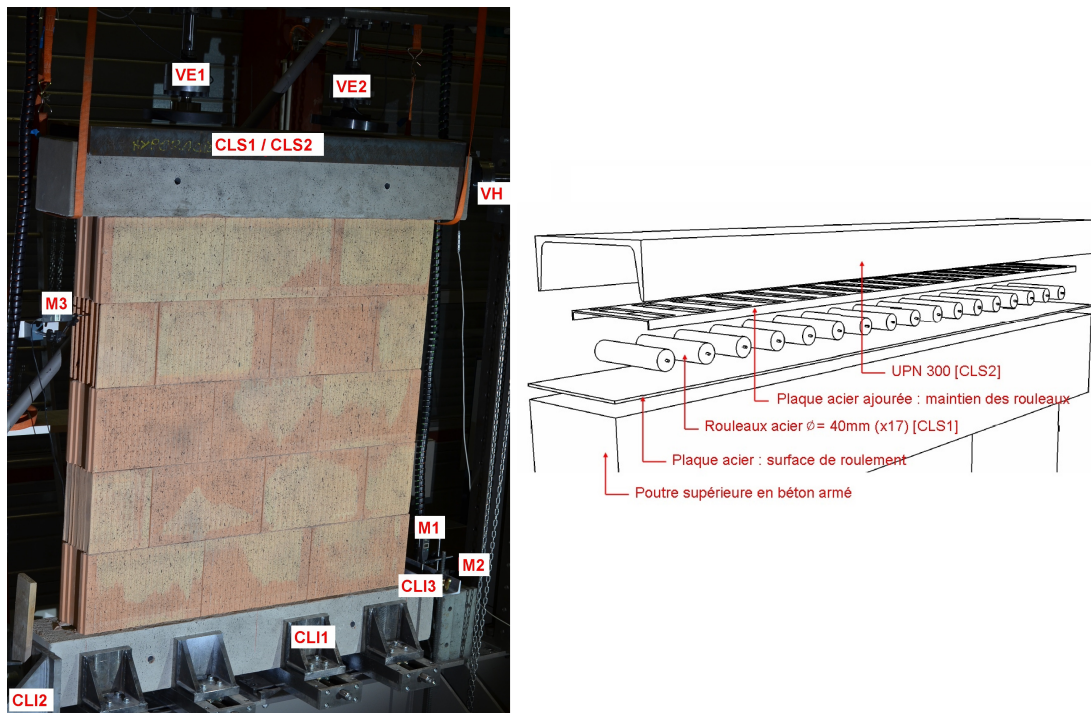


Figure 3. Présentation du dispositif expérimental (à gauche). Détails de CLS1/CLS2 (à droite).

respectivement. Au vu de ces résultats, un bon maintien entre la poutre inférieure et le bâti peut être considéré. Ces résultats permettent de valider que les expérimentations sont bien conformes au protocole prédéfini.

De plus, les essais montrent une bonne répétabilité des expérimentations, tant au niveau de la réponse de la maçonnerie aux sollicitations exercées (courbes Effort-Déplacement, figure 4) qu'au niveau du mode de rupture obtenu. En effet, suivant la configuration testée, deux modes de ruptures différents ont été obtenus. La figure 5

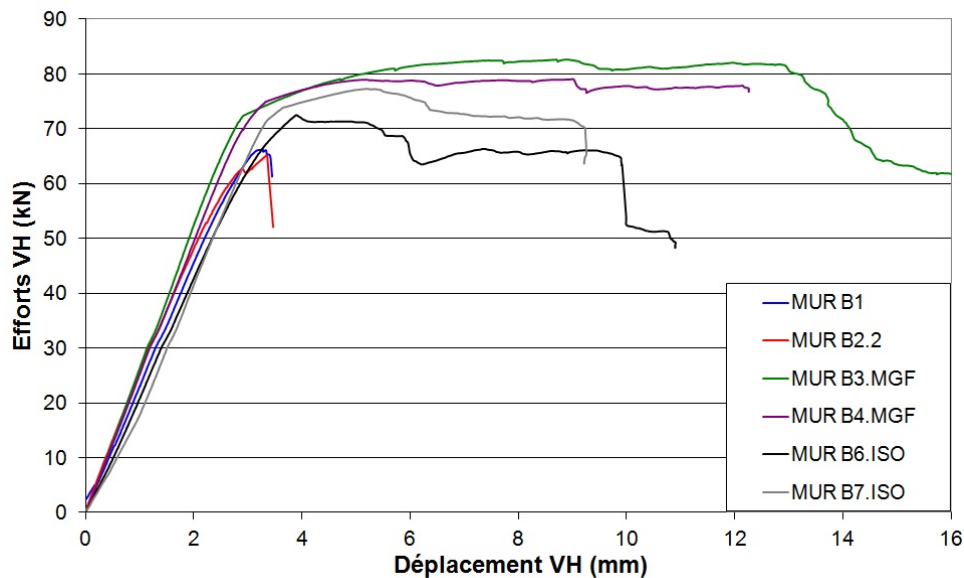


Figure 4. Évolution de l'effort horizontal en fonction du déplacement du vérin VH.

montre un exemple de fissuration pour les murs nus (ici B1) ainsi que pour les murs recouverts d'enduit isolant (ici B7). Ces deux types d'éprouvettes ont connu une rupture en cisaillement avec la propagation d'une fissure en escalier le long des joints horizontaux et verticaux. On notera également la fissuration des briques en contact

avec les poutres inférieures et supérieures. Du point de vue de la fissuration de l'enduit isolant, aucun décollement n'a été observé, même après rupture de la maçonnerie. On remarquera également que la fissuration de la couche d'enduit suit la fissuration de la maçonnerie qui a été observée a posteriori, une fois la couche d'enduit retirée.

En revanche, les murs recouverts d'enduit MGF ont subi une rupture en flexion avec mise en traction au niveau du joint horizontal entre la poutre basse et la première rangée de briques. De ce fait, le comportement mécanique de ces derniers ne peut être comparé aux éprouvettes ayant connu une rupture majoritairement en cisaillement. Par conséquent, en comparant la réponse des murs nus (B1 et B2) à celle des murs enduits avec ISO (B6 et B7), on peut observer que pour ces murs enduits, la rupture a lieu pour des valeurs légèrement plus grandes en termes d'effort et de déplacement. Ces résultats laissent donc penser que la couche d'enduit est à l'origine d'un comportement ductile de l'éprouvette.

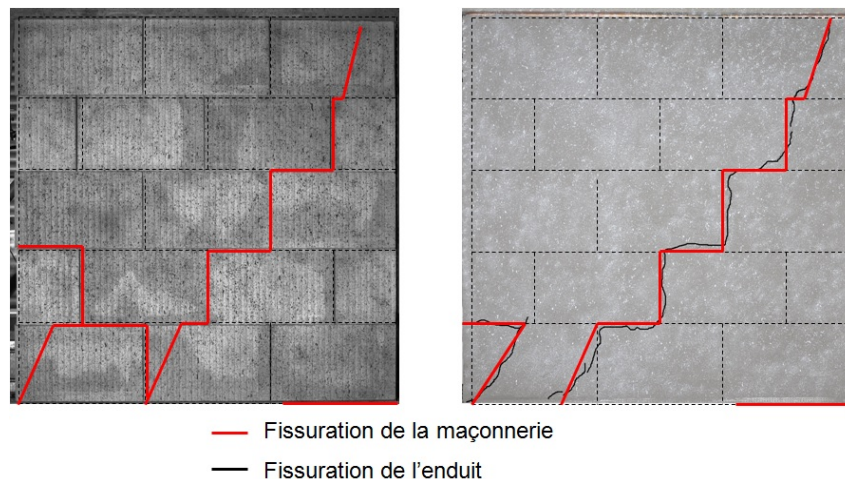


Figure 5. Fissuration observée au sein de la maçonnerie et de l'éventuelle couche d'enduit. A gauche, un exemple de mur nu (B1) ; à droite, un exemple de mur recouvert d'enduit ISO (B7).

5. Analyse par corrélation d'images

La corrélation d'images numériques (CIN) a été réalisée à l'aide du logiciel 7D développé par le laboratoire SYMME d'Annecy-le-Vieux [VAC 99]. Ce logiciel permet de mesurer le champ de déplacements à la surface d'une éprouvette en comparant une image déformée à une image de référence. La prise d'images a ici été réalisée à l'aide d'une caméra numérique noir et blanc possédant une résolution de 16 millions de pixels. La précision des mesures de déplacement par cette méthode est de $\pm 0,01$ mm avec la configuration utilisée (caméra, éclairage, mouchetis,...). Cette précision est semblable à celle des comparateurs de déplacements M1 à M3.

Ainsi, ce système de mesures permet d'observer le comportement de la maçonnerie tout au long de l'essai par la prise d'images successives. Il est ainsi possible de visualiser plus finement l'évolution de la fissuration au sein de la maçonnerie. Par exemple, l'observation des déformations principales permet de mettre en avant cette évolution de la fissuration. Ces déformations sont calculées d'après les déformations principales, telles que :

$$\epsilon_{shear} = \frac{\epsilon_{max} - \epsilon_{min}}{2} \quad [1]$$

Ici, une première analyse qualitative a été effectuée, les valeurs de déformations mesurées lors de la fissuration établie n'étant pas pertinentes. Les figures 6 et 7 montrent le faciès de rupture des éprouvettes B1 (mur nu) et B6 (mur recouvert de l'enduit ISO), respectivement. La figure 6 montre que la rupture en cisaillement intervient au niveau du pic de chargement et que la rupture est plutôt brutale. Sur la figure 7, l'observation est faite sur la surface extérieure de la couche d'enduit. Par conséquent, les déformations mesurées ne peuvent pas être considérées comme étant celle de la maçonnerie. Cependant, il est possible d'observer que la fissuration de la partie extérieure de la couche d'enduit ISO n'intervient pas avant le pic de chargement.

En observant la fissuration d'un point de vue quantitatif, il est possible de comparer le niveau de déformation à l'ouverture de la fissure. Ainsi, il est possible d'observer une fissuration de la brique à partir d'une déformation

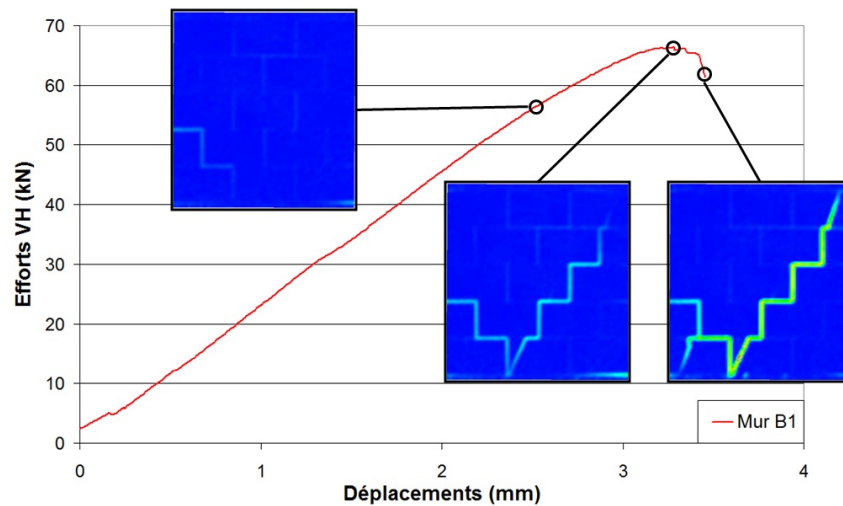


Figure 6. Évolution de la fissuration du mur nu B1 en fonction du déplacement du vérin horizontal VH.

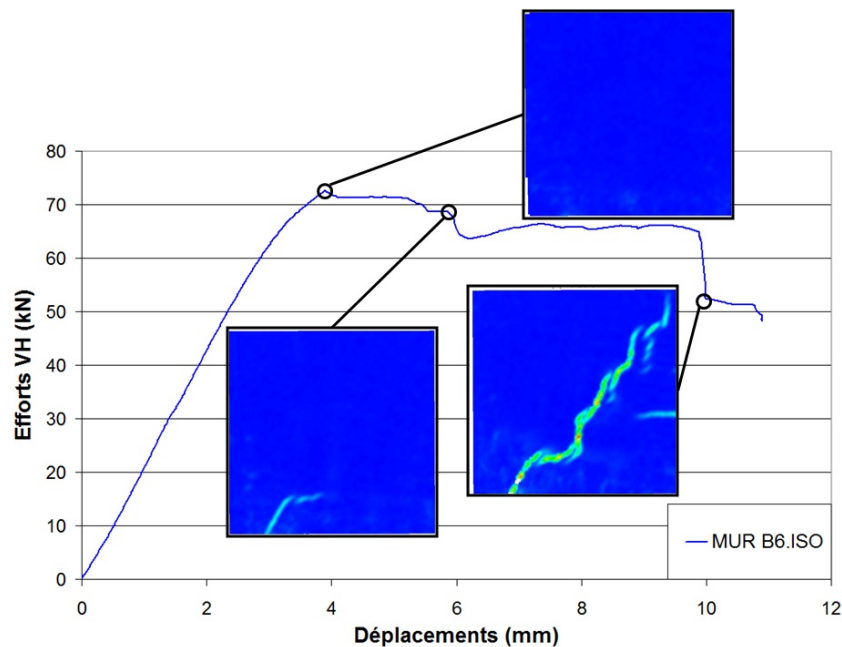


Figure 7. Évolution de la fissuration du mur nu B1 en fonction du déplacement du vérin horizontal VH.

proche de $\epsilon_{shear} = 0,002$. Pour la couche d'enduit ISO, la déformation à l'apparition de la fissuration est de $\epsilon_{shear} = 0,006$. Le logiciel permet également l'étude des directions principales de déformations. Les résultats montrent que la fissuration intra-briques de la maçonnerie est due à des déformations en traction. Il en est de même pour la fissuration de la couche d'enduit ISO. Concernant la rupture de cette couche d'enduit, il est possible que la rupture en cisaillement conduise à un déplacement relatif normal à la surface de rupture, donnant donc l'impression d'une rupture en traction.

La rupture de la maçonnerie a donc été constatée avant la fissuration de la couche d'enduit ce qui permet de conclure sur la bonne tenue mécanique de cette solution d'isolation thermique.

6. Conclusion

Tout d'abord, la bonne reproductibilité des essais et le bon fonctionnement des conditions aux limites expérimentales ont permis de réaliser une étude cohérente de ces maçonneries. Les différents modes de ruptures obtenus

n'ont pas permis une bonne comparaison de l'apport mécanique entre l'enduit ISO et le MGF. Cependant, l'apport de l'enduit ISO par rapport à un mur nu a pu être étudié, pour une sollicitation en cisaillement. Malgré sa faiblesse mécanique, une fissuration plus tardive de la couche d'enduit isolant est constatée, par rapport à la fissuration au sein d'un mur nu, à sa rupture. De plus, un léger gain en terme de résistance au cisaillement est constaté. Globalement, cet enduit a montré un comportement satisfaisant avec une bonne accroche au support, même après rupture de l'éprouvette ; ainsi qu'une fissuration suivant uniquement le faciès de rupture de la maçonnerie. Il n'a cependant pas été possible expérimentalement de reproduire le même mode de rupture pour les maçonneries recouvertes d'enduit MGF du fait de sa résistance mécanique bien supérieure à celle de l'enduit isolant. De plus, le fait que la fissuration de la couche d'enduit intervienne pour des niveaux de déformations plus élevés par rapport à la brique laisse présager une bonne pérennité de cette solution d'isolation. De plus, les directions principales des déformations ont montré une rupture de l'enduit due à des déformations en traction, et ce quelles que soient les zones de ruptures considérées (joints verticaux ou horizontaux, ou au sein des briques). Donc, la capacité de déformation ainsi que la résistance en traction du matériau semblent être les paramètres influençant le plus la résistance de cette couche d'ajout. Il pourrait être intéressant de réaliser une étude similaire avec des niveaux de pré-compression plus importants de manière à pouvoir comparer l'apport de l'enduit MGF en cisaillement.

De plus, une analyse numérique est en cours de réalisation. Celle-ci possède plusieurs objectifs. Premièrement, reproduire le comportement mécanique d'une maçonnerie nue. Ensuite, y ajouter la couche d'enduit et observer la réponse du modèle. Cette modélisation permettra de confirmer ou non le comportement mécanique de l'interface analysée dans la précédente étude, à l'échelle locale.

Remerciements

Les auteurs remercient les sociétés Wienerberger et Parexlanko pour leur avoir fourni les matériaux et le savoir-faire nécessaires à la réalisation des éprouvettes.

Merci également à l'équipe technique du LOCIE pour son aide lors de la mise en place des expérimentations.

Les auteurs remercient également l'ensemble des partenaires du projet FUI Parex-IT.

7. Bibliographie

- [EYM 15] EYMARD M., PLASSIARD J.-P., PERROTIN P., LE FAY S., « Interfacial strength study between a concrete substrate and an innovative sprayed coating », *Construction and Building Materials*, vol. 79, p. 345-356, 2015.
- [HAA 09] HAACH V., Development of a design method for reinforced masonry subjected to in-plane loading based on experimental and numerical analysis, PhD thesis, Universidade do Minho - Escola de Engenharia, 2009.
- [IBR 14a] IBRAHIM M., BIWOLE P., WURTZ E., ACHARD P., « Limiting windows offset thermal bridge losses using a new insulating coating », *Appl Energy*, vol. 123, p. 220-231, 2014.
- [IBR 14b] IBRAHIM M., BIWOLE P., WURTZ E., ACHARD P., « A study on the thermal performance of exterior walls covered with a recently patented silica-aerogel-based insulating coating. », *Build Environ*, vol. 81, p. 112-122, 2014.
- [ICB 87] ICB, International recommendations for design and erection of unreinforced and reinforced masonry structures. Publication 94, Rotterdam, rapport, International Council for Buildings, 1987.
- [RAI 92] RAIJMAKERS T., VERMELTFOORT A., Deformation Controlled Test in Masonry Shear Walls (in dutch). Report B-92-1156, rapport, TNO-Bouw, Delft, The Netherlands, 1992.
- [TOM 09] TOMAZEVIC M., « Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6 : shear versus tensile strength of masonry », *Materials and structures*, vol. 42, p. 889-907, 2009.
- [TOM 12] TOMAZEVIC M., WEISS P., « Robustness as a criterion for use hollow clay masonry units in seismic zones. », *Materials and Structures*, vol. 45, p. 451-559, 2012.
- [VAC 99] VACHER P., DUMOULIN S., MORESTIN F., MGUIL-TOUCHAL S., « Bidimensional strain measurement using digital images », *Proc Inst Mech Eng*, vol. 213, p. 811-7, 1999.
- [VER 93] VERMELTFOORT A., RAIJMAKERS T., JANSSEN H., « Shear tests on masonry walls », *The Sixth North American Masonry Conference, Philadelphia, Pennsylvania*, p. 1183-1193, 1993.