

Comportement sismique des maçonneries non armées : de la campagne expérimentale à la modélisation numérique

Christophe Mordant¹, Vincent Denoël², Hervé Degée³

¹ Université de Liège, Département ArGEnCo, Place du XX août 7, 4000 Liège, Belgique, cmordant@ulg.ac.be

² Université de Liège, Département ArGEnCo, Place du XX août 7, 4000 Liège, Belgique, v.denoel@ulg.ac.be

³ Universiteit Hasselt, Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen, Agoralaan, Building D, 3590 Diepenbeek, België, herve.degee@uhasselt.be

RÉSUMÉ. La présente contribution décrit trois campagnes expérimentales visant à améliorer la compréhension du comportement des maçonneries portantes non armées sous action sismique. Au cours de ces campagnes, des essais cycliques et sur table à secousses ont été réalisés sur des murs simples ou présentant un détail constructif particulier (ouverture, mur perpendiculaire ou présence de joints en caoutchouc en pied et tête de mur pour des raisons acoustiques). Les murs testés, leur instrumentation et le déroulement des essais sont tout d'abord décrits. Ensuite, les principaux résultats expérimentaux sont fournis. Seuls les résultats utiles pour la modélisation numérique des murs étudiés sont repris ici. Parmi ces derniers, les propriétés mécaniques (modules d'élasticité et de cisaillement) et les courbes « force-déplacement » sont de première importance. Enfin, les murs sont modélisés à l'aide du logiciel TREMURI et les prédictions numériques obtenues sont comparées aux résultats expérimentaux. Cette comparaison montre qu'une modélisation de la maçonnerie à l'échelle « macro » prédit correctement le mode de ruine permet de reproduire le comportement global des murs de manière satisfaisante.

ABSTRACT. The present contribution describes three experimental campaigns aiming at improving the understanding of the seismic behaviour of unreinforced load-bearing masonry structures. The campaigns considered in this paper consisted in static cyclic and shake table tests on simple unreinforced masonry walls with some of them including specific details as, for instance, an opening, a perpendicular wall or rubber layers at their bottom and top for acoustic reasons. First, the tested walls are described with their instrumentation and test sequence. The main experimental results are then provided. This information is expressed in terms of mechanical properties and force-displacement curves. Finally, the walls are modelled in the software TREMURI and the numerical predictions are compared to the experimental measurements. This comparison shows that a modelling at the macro-scale predicts the right failure mode and provides results in good agreements with the global behaviour of the walls.

MOTS-CLÉS : maçonnerie non armée, essais cycliques, table à secousses, modélisation.

KEY WORDS : unreinforced masonry, cyclic tests, shake table tests, numerical model.

1. Introduction

La maçonnerie est, de loin et historiquement, le matériau le plus utilisé comme système structurel pour les logements en Europe de l'Ouest, comme en Angleterre [DEP 10] et, plus particulièrement, en Belgique. Depuis la crise énergétique de 1973, la maison en maçonnerie a connu diverses évolutions et modifications afin de répondre aux exigences croissantes en termes de confort individuel et de performances physiques du bâtiment. Il est aujourd'hui question de « maison passive » [PAS 15]. En Belgique, ces exigences ont conduit à construire des maisons dont les murs ne sont plus monolithiques, mais constitués d'un mur porteur d'épaisseur réduite (15-20 cm) combiné à un mur de façade distinct et entre lesquels un matériau isolant est placé (voir Figure 1 (a)). Afin de respecter les niveaux d'exigence actuels, des détails constructifs supplémentaires ont dû être développés et consistent à réaliser le premier lit de blocs avec un matériau hautement isolant, comme des blocs en béton cellulaire (Y-tong). Cette solution est illustrée à la Figure 1 (b).

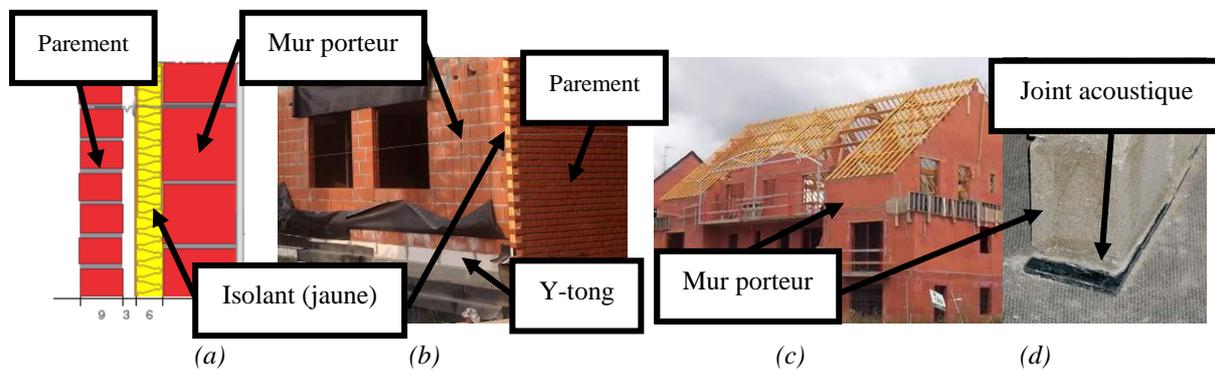


Figure 1. Evolution des structures en maçonnerie non armée et nouvelles applications.

Outre les aspects thermiques, la maçonnerie n'est plus uniquement utilisée comme système structurel dans les maisons unifamiliales. En effet, des immeubles à appartements de 5 ou 6 étages sont de nos jours construits en maçonnerie non armée portante (Figure 1 (c)), sans aucune forme de renforcement. Ce nouveau domaine d'application a pour conséquence d'augmenter le niveau de compression de la maçonnerie vu l'augmentation de la hauteur et de la masse inhérente. Ce niveau est dès lors plus proche de la limite de résistance. L'immeuble étant occupé par plusieurs ménages, des exigences en termes d'acoustique sont également requises. Afin d'assurer une insonorisation suffisante, des couches de caoutchouc sont, par exemple, placées en pied et tête de mur (Figure 1 (d)).

Depuis 2011, la conception parasismique des bâtiments est obligatoire en Europe et ses principes sont repris dans la norme européenne Eurocode 8 [EC8 04]. Cependant, des études [KAR 09, DEG 07] ont montré que ces règles conduisent à un niveau de sécurité très, voire trop, élevé lorsque la zone considérée est de sismicité faible à modérée, comme en Belgique. De plus, ces règles ne sont pas adaptées aux méthodes de construction traditionnelles, rendant les solutions structurelles en maçonnerie non armée économiquement peu compétitives. Enfin, les normes actuelles n'intègrent pas les dernières solutions constructives décrites ci-avant. Par conséquent, il est nécessaire de réviser les règles visant à assurer la stabilité des constructions sous action sismique.

Afin de contribuer à cette révision, deux campagnes expérimentales ont été réalisées en 2011 à l'Université de Liège. Ces campagnes avaient pour but d'améliorer la compréhension du comportement sismique de murs en maçonnerie non armée moderne (joints horizontaux minces avec système de tenon-mortaise pour les joints verticaux) à l'aide d'essais cycliques. L'influence des nouvelles solutions constructives, d'une ouverture dans le mur ou de la présence d'un mur perpendiculaire à l'action sismique a également été étudiée. Le comportement de chacune de ces variantes a été comparé à la réponse d'un mur simple. D'autres essais ont lieu à la même période [COS 11, POR 10, SOU 14], mais portent sur des types d'appareillage différents. Parmi ceux-ci, peu se sont intéressés aux nouvelles dispositions constructives [MAR 14].

Cet article résume les deux campagnes expérimentales réalisées à Liège sur de la maçonnerie non armée moderne avec des blocs en terre cuite. Il décrit tout d'abord les murs testés, leur instrumentation et le déroulement des essais. Les résultats principaux sont ensuite fournis et exprimés en termes de mode de ruine, de courbes « force-déplacement » et de propriétés mécaniques. Enfin, les murs sont modélisés à l'aide du logiciel TREMURI [LAG 13] afin de comparer les prédictions numériques aux résultats expérimentaux.

2. Description des murs testés et de la procédure d'essai

7 murs ont été testés au cours de deux campagnes expérimentales. D'une part, 4 murs (A1-4), de mêmes dimensions globales (3.00m de long, 2.80 m de haut et 0.14 m d'épaisseur), avaient une section rectangulaire. Le mur A1 était un simple mur sans détails particuliers. Au contraire, les murs A2 et A3-4 possédaient respectivement une bande de caoutchouc d'1 cm d'épaisseur à sa base et à sa tête ou une ouverture de 2.00 m de haut sur 0.90 m de largeur, créant une asymétrie dans le plan du mur. La différence entre ces derniers murs résidait dans la longueur de support du linteau, à savoir 0.15 m (A3) et 0.45 m (A4). Ces murs ont été soumis à une niveau de compression de 1.00 MPa, à l'exception du mur avec dispositifs en caoutchouc (0.50 MPa). D'autres part, 3 murs identiques de 2.50 m de long, 2.80 m de haut et 0.15 m d'épaisseur était chacun collé perpendiculaire à un mur (1.50 m x 2.80 m x 0.15 m). Le premier est appelé « mur de cisaillement » et le second, « semelle ». Ces murs (C1-3) ont été soumis à différents niveaux de compression (0.75, 1.00 et 1.25 MPa). Les propriétés mécaniques des 7 murs sont données au Tableau 1.

L'instrumentation mise en place pour les deux ensembles de murs est illustrée à la Figure 2. Pour les spécimens A1-4, le déplacement horizontal H_{sup} , le déplacement vertical en deux points (V_1 , V_2) et la rotation Rot de la poutre supérieure ont été mesurés. Le déplacement de la poutre inférieure H_{inf} a également été enregistré, de même que celui au niveau du sommet de l'ouverture (H_{int}) lorsqu'il y en avait une. Des capteurs supplémentaires ont été installés pour les spécimens C1-3 : déplacement vertical de la poutre supérieure ($V_{m,g}$, $V_{m,d}$) et le déplacement des coins supérieurs du mur de cisaillement ($H_{w,1}$ et $H_{w,2}$). De plus, le comportement de la connexion entre les deux murs perpendiculaires a été étudiée à l'aide de quatre capteurs ($H/V_{j,1/2}$). Enfin, le déplacement horizontal à mi-hauteur de la semelle a été mesurée en trois points ($H_{g,m,d}$). La compression verticale et le cisaillement horizontal au niveau de la poutre supérieure ont également été mesurés à l'aide de 2 capteurs supplémentaires. Les murs ont été construits entre 2 poutres de béton armé représentant les planchers.

Tableau 1. Propriétés mécaniques des murs.

Mur		A1-4	C1-3
Résistance moyenne normalisée à la compression d'un bloc (EN 772-1 Annexe A)	[MPa]	13	15
Résistance caractéristique à la compression (NBN-EN 1996-1-1)	[MPa]	3.9	4.4
Résistance caractéristique initiale au cisaillement de la maçonnerie (NBN-EN 1996-1-1)	[MPa]	0.3	0.3
Valeur limite de la résistance caractéristique au cisaillement (NBN-EN 1996-1-1)	[MPa]	0.585	0.675

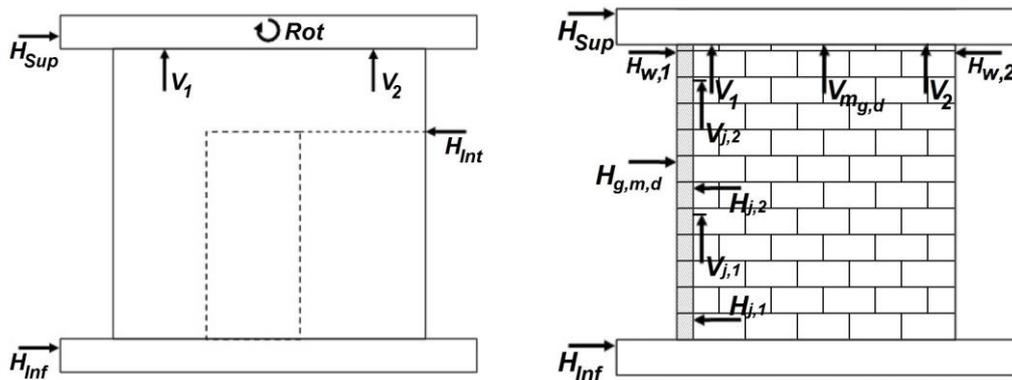


Figure 2. Instrumentation des murs (murs A 1-4 à gauche ; murs C 1-3 à droite).

Les campagnes se sont déroulées en 2 phases. La première était la mise en compression homogène des murs à l'aide de vérins hydrauliques. La seconde phase correspondait à l'essai cyclique quasi statique en tant que tel, avec contrôle du déplacement horizontal via un vérin hydraulique. Le niveau de déplacement fût augmenté tous les 3 cycles.

3. Résultats des campagnes expérimentales

Observer l'endommagement progressif des murs au cours des essais fournit des informations utiles pour apprécier le type de mode de ruine. La détérioration du mur sans dispositif particulier (A1) a produit des fissures diagonales et un écrasement des coins inférieurs du mur, typique d'un mode de ruine mélangeant cisaillement et flexion (voir Figure 3 (a)). La présence de dispositifs acoustiques (mur A2) a modifié ce mode de ruine. En effet, une fissure verticale a été initiée lors de la phase de compression du mur et est due à la présence des joints acoustiques. En effet, la déformation transversale du caoutchouc (effet Poisson) est plus importante que celle de la maçonnerie. Cette dernière est donc sollicitée en traction. Vu leur faible résistance en traction, les blocs se sont alors fissurés. Cette fissure s'est propagée dans le tiers supérieur du mur avant de devenir diagonale et de rejoindre les coins inférieurs (Figure 3 (b)). Concernant les deux murs avec une ouverture, la ruine du mur A3 est arrivée prématurément et provient de l'écrasement local de la maçonnerie sous les appuis du linteau (Figure 3 (c)). La prévention de cette ruine locale est assurée par une longueur d'appui plus importante. En effet, le mur A4 n'a pas développé ce type de ruine et a pu résister à un déplacement imposé plus important. Le mode de ruine de ce mur fut en cisaillement avec des fissures diagonales partant de la base du linteau, traduisant une ruine en cisaillement (Figure 3 (d)). Le mode de ruine des murs dont la section transversale formait un T (murs C1-3) est

illustrée à la Figure 3 (e) et montre une fissuration diagonale typique d'une ruine en cisaillement. La connexion entre les deux pans de murs perpendiculaires a été pleinement efficace et le joint n'a pas été endommagé.

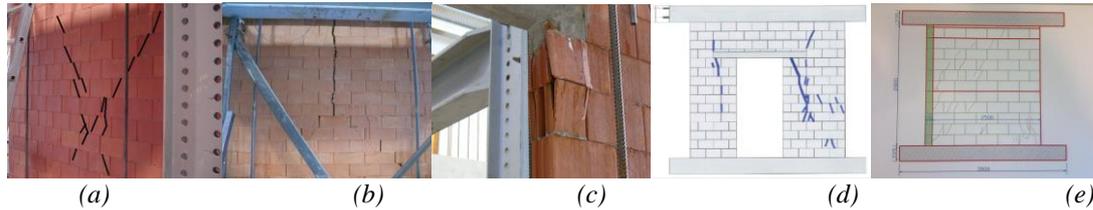


Figure 3. Mode de ruine des murs A1-4 (a-d) et des murs C1-3 (e).

Le principal résultat caractérisant un essai cyclique est la courbe « force-déplacement ». A partir de celle-ci, il est possible de définir l'enveloppe de la réponse et de calculer une courbe bilinéaire élastique parfaitement plastique équivalente. Cette dernière est caractérisée par sa raideur initiale k_{ini} , son déplacement à la limite élastique d_y et sa ductilité μ . Elle est construite de la manière suivante : (i) définition de la raideur initiale comme la raideur sécante à 50 % de la force maximale, (ii) déplacement ultime pris égal au déplacement maximum de l'enveloppe et (iii) détermination de la limite élastique de sorte que l'aire sous la courbe bilinéaire soit égale à celle sous l'enveloppe. Ces courbes sont également illustrées à la Figure 4 pour les murs A1 et A2. Les informations fournies par la courbe bilinéaire sont présentées au Tableau 2 en termes de déplacement/force maximum et d'énergie dissipée.

Tableau 2. Informations obtenues sur base des courbes « force-déplacement ».

Mur		A1	A2	A3	A4	C1	C2	C3
Charge max. +	[kN]	129.2	75.3	71.6	76.5	110.6	142.0	162.0
Charge max. -	[kN]	121.5	74.4	75.4	75.7	124.7	154.4	168.4
Déviat. max. +	[mm] / [%]	7.94/0.284	22.38/0.799	8.02/0.286	6.42/0.229	8.09/0.289	6.11/0.218	5.01/0.179
Déviat. max. -	[mm] / [%]	7.87/0.281	22.41/0.800	8.18/0.292	4.98/0.178	6.96/0.249	5.58/0.199	5.02/0.179
Energie dissipée	[Nm]	2517	15 759	1149	1288	9173	5173	4386

La comparaison des deux graphiques de la Figure 4 montre clairement l'influence des bandes de caoutchouc sur le comportement du mur de maçonnerie. En effet, sa présence donne lieu à des déplacements horizontaux plus grands sous de plus faibles charges horizontales. Ceci peut être expliqué par la flexibilité apportée par le caoutchouc. La présence des dispositifs acoustiques augmente également la dissipation d'énergie étant donné que le nombre plus élevé d'hystérésis et leur forme.

En termes de charge maximale, une légère différence est observée (5.96 %) pour le mur A1 alors qu'il est symétrique. En présence de caoutchouc, cette charge est réduite d'environ 40 %. La différence entre les directions positive et négative est cependant réduite. Pour les murs avec ouverture (A3-4), une réduction similaire est observée par rapport au mur A1. La charge maximale diffère plus entre les deux directions pour le mur A3 (5.04 %) que pour le mur A4 (1.05 %). La ruine prématurée des blocs situés directement sous le linteau explique cette différence. En effet, le signe + correspond à la surcompression de ces blocs qui ruine par écrasement. Lorsqu'il n'y a pas de ruine locale, le sens de sollicitation et la longueur du linteau influencent peu la charge maximale, vu la différence entre, respectivement, les deux sens de sollicitations du mur A4 (1.05 %) et les murs A3 et A4 dans le sens négatif (0.40 %). Les murs C1-3 montrent qu'une augmentation du niveau de compression induit une résistance latérale plus élevée. L'influence du mur perpendiculaire est également bien visible, vu la différence de résultats dans les deux directions (11.31 % pour C1). Cette différence est cependant réduite lorsque le niveau de compression augmente (3.80 % pour C3).

En termes de déplacement, la présence de caoutchouc triple les valeurs mesurées alors que la charge maximale est diminuée, ce qui confirme la réduction de raideur induite par ces dispositifs. L'asymétrie des murs A3-4 n'est remarquable que pour le mur A4, avec une différence relative de 13.97 % entre les deux sens. La ruine locale prématurée du mur A3 peut expliquer l'absence de différence pour ce dernier. Pour les murs C1-3, les résultats mènent aux mêmes conclusions que pour les charges, à savoir une augmentation de la raideur latérale et une influence plus faible du mur perpendiculaire lorsque le niveau de compression du mur augmente.

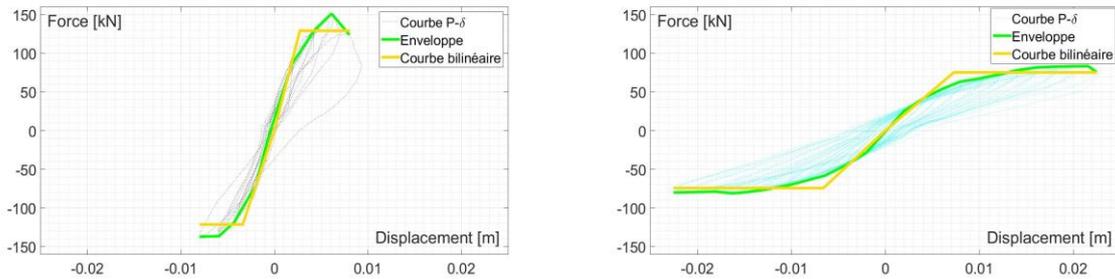


Figure 4. Courbes « force-déplacement » des murs sans (A1) et avec (A2) caoutchouc

Dans l'optique de modéliser les murs, leurs propriétés mécaniques constituent des données très utiles. Dans le cas présent, le module d'élasticité a été calculé sur base des mesures acquises durant la mise en compression des murs. Le module de cisaillement, quant à lui, est obtenu grâce aux données enregistrées durant l'essai cyclique. L'hypothèse d'un mur encastré en base et libre en tête a été faite pour calculer les valeurs données au Tableau 3. Deux remarques importantes sont à faire. D'une part, les modules sont des modules équivalents calculés dans l'optique d'une modélisation numérique à l'échelle « macro » des murs à l'aide d'éléments de poutres isotropes. D'autre part, ces valeurs ne permettent que de représenter correctement les premiers cycles de chargements à cause de la dégradation progressive des murs. Les grandes différences entre les murs A1-3 et A4, ainsi que celle entre le mur C1 et C2-3, ne peuvent s'expliquer que par la variabilité inhérente des procédés de fabrication de la maçonnerie, qui reste un matériau hétérogène, ou par la qualité du maçonage.

Tableau 3. Evaluation des propriétés mécaniques équivalentes des murs A1-4 et C1-3

Mur		A1	A2	A3	A4	C1	C2	C3
Module d'élasticité	[MPa]	2464.7	2464.7	2425.9	3542.5	2773.6	3692.8	3662.5
Module de cisaillement	[MPa]	394.4	394.4	218.3	351.9	346.7	477.4	561.4

4. Modélisation numérique et comparaisons

Les résultats présentés dans cette section sont une extension du travail présenté lors de la conférence SECED 2015 [MOR 15b] où la version commerciale du programme TREMURI avait été utilisée pour la modélisation des murs décrits ci-dessus. TREMURI est un logiciel dédié aux structures en maçonnerie et développé à l'Université de Gênes. Le programme est un outil puissant qui modélise les structures par des portiques équivalent avec des éléments de type « poutre non linéaire », à l'échelle macro. La principale amélioration des derniers résultats obtenus réside dans l'utilisation d'une loi matérielle multilinéaire (Figure 5 (gauche)). En effet, la version commerciale ne permet que l'utilisation d'une loi bilinéaire. De plus, l'analyse effectuée pour cette contribution est une analyse cyclique avec contrôle du déplacement.

La méthodologie suivie pour obtenir les prédictions numériques fournies ci-dessous est la suivante. Partant des résultats expérimentaux relatifs au mur simple soumis à un essai cyclique (mur A1), les paramètres de la loi matérielle sont calibrés afin de faire correspondre les prédictions numériques à la courbe « force-déplacement » expérimentale. Une fois la correspondance satisfaisante, les paramètres déterminés sont utilisés pour la modélisation des autres murs constitués de la même sorte de bloc en terre cuite (murs A2-4). Un exemple du modèle défini pour les murs avec ouverture est donné à la Figure 5 (droite). Sur celle-ci, les parties de murs situées de part et d'autre de l'ouverture sont représentées par une poutre verticale, tandis que la maçonnerie située au-dessus de l'ouverture est modélisée par une poutre horizontale. Les différentes poutres sont connectées entre elles à l'aide de nœuds rigides. La même méthodologie a été appliquée pour les murs C1-3, mais n'est pas illustré dans cet article due à la limitation de longueur.

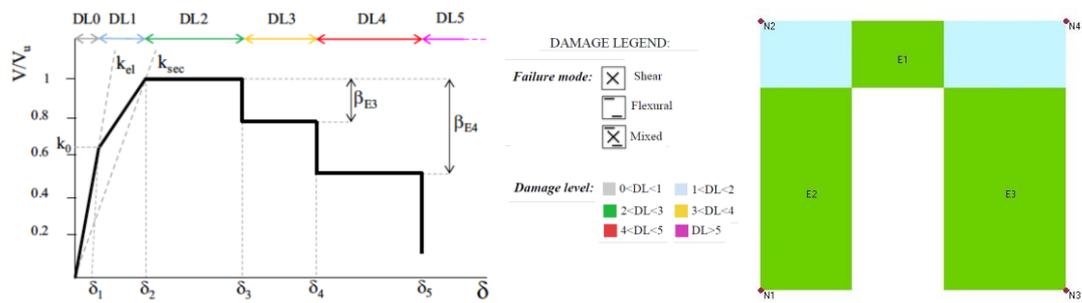


Figure 5. Loi matérielle multilinéaire (gauche) et modèle pour mur avec ouverture (droite) dans TREMURI

La Figure 6 compare les courbes « force-déplacement » expérimentale et prédite par le modèle numérique pour le mur simple sans détails particuliers (mur A1). Cette dernière a été fournie par TREMURI en considérant le module d'élasticité évalué sur base des résultats expérimentaux. Le module de cisaillement a dû être modifié afin que la raideur initiale du modèle soit en accord avec celle déduite des mesures expérimentales. Les principaux paramètres de la loi matérielle sont repris dans le Tableau 4. Les unités en vigueur sont celles du SI. Il faut également noter que le mode de ruine prédit par le modèle est similaire à celui observé au cours de la campagne d'essais, à savoir un mode combinant les ruines en cisaillement et en flexion. Les courbes expérimentale (en bleu) et théorique (en rouge) montrent une très bonne correspondance, hormis pour le comportement après ruine, localisé par le cercle noir sur la Figure 6.

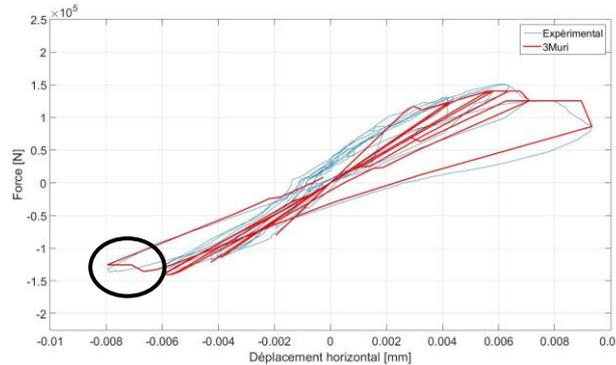


Figure 6. Comparaison des courbes « force-déplacement » pour le mur A1

Tableau 4. Paramètres de la loi matérielle pour le mur A1.

Paramètre	Module cisaillement	Résistance compr.	Résistance cisail. ini.	Résistance cisail. ult.	k_{el}/k_{sec}
Valeur	540061166	3900000	300000	585000	1.400
Paramètre	δ_3 (flex./cisail.)	δ_4 (flex./cisail.)	δ_5 (flex./cisail.)	β_3 (flex./cisail.)	β_4 (flex./cisail.)
Valeur	0.000705/0.003150	0.000975/0.004250	0.003000/0.008000	0.705/0.825	0.365/0.825

La Figure 7 effectue la même comparaison que la Figure 6 pour le mur avec une ouverture (A3). Deux courbes sont présentes sur la Figure 7 (gauche) car des modifications de la loi matérielle ont été nécessaires pour améliorer la correspondance avec les mesures expérimentales. En effet, l'utilisation des paramètres définis au Tableau 4, tant pour les éléments représentant les parties verticales qu'horizontales du mur menait à la ruine de l'élément horizontal (en rouge), alors que cette partie du mur n'a pas été endommagée durant les essais. Cette problématique est bien connue [BEY 13] et a été résolue ici en multipliant par 10 les valeurs des paramètres δ_3 , δ_4 et δ_5 pour le cisaillement de la loi affectée à l'élément horizontal du modèle afin de ne plus observer la ruine de cet élément (en vert). Une attention particulière est requise pour la modélisation des éléments horizontaux car leur comportement diffère des éléments verticaux. Ceci est cependant en dehors du sujet traité et la multiplication par 10 sert uniquement à éviter une ruine non pertinente au vu des observations et résultats expérimentaux.

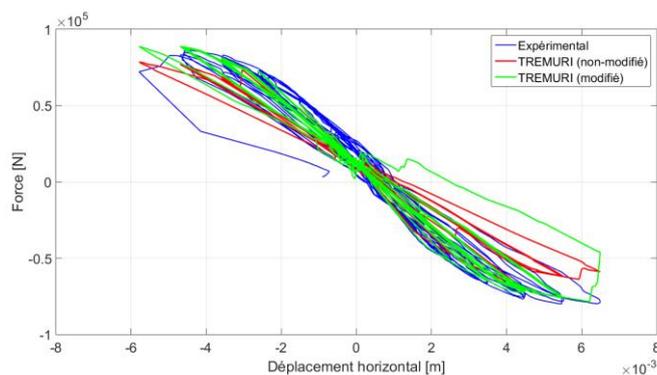


Figure 7. Courbes « force-déplacement » (mur A4)

Un travail similaire a été effectué pour le mur A2, incluant des bandes de caoutchouc. La reproduction des mesures expérimentales peut être accomplie en définissant un élément aux propriétés mécaniques équivalentes ou en modélisant les bandes de caoutchouc par des éléments de poutre connectés à l'élément représentant le mur de maçonnerie. Pour cette seconde solution, il est nécessaire de réduire de moitié la résistance à la compression de la maçonnerie. Dans cette configuration, la raideur du mur équivaut à 1/3 de celle du mur sans caoutchouc.

5. Conclusions

Cet article traite deux campagnes expérimentales sur des murs de maçonnerie moderne non armé dont les blocs sont en argile. Le but de ces campagnes est de mieux comprendre le comportement sismique de ce type de maçonnerie et d'étudier les effets sur ce comportement de solutions structurelles répondant aux exigences actuelles en termes de confort individuel et de performances physiques des bâtiments. Ces campagnes mettent en œuvre différents des essais cycliques quasi-statique visant à représenter l'action sismique. Suite à la description des murs testés et des principaux résultats expérimentaux, le logiciel TREMURI a servi à modéliser les murs étudiés afin de comparer les prédictions numériques aux résultats expérimentaux. Les conclusions qui en découlent sont les suivantes.

D'une part, le comportement global des murs simples est bien appréhendé par TREMURI. Les courbes « force-déplacement » expérimentales sont reproduites de manière pertinente grâce à la modélisation des murs à l'aide d'une loi matérielle multilinéaire.

D'autre part, la présence de bandes de caoutchouc pour des raisons acoustiques ou d'une ouverture modifie le comportement sismique du mur. Le premier augmente la déformabilité du mur, mais permet une meilleure dissipation d'énergie. Le second peut conduire à une ruine prématurée et locale de la structure si la longueur d'appui du linteau n'est pas suffisante. La modélisation de ces spécificités via un modèle « macro » fournit des résultats pertinents. Il est cependant nécessaire d'accorder une attention particulière aux éléments horizontaux.

6. Remerciements

C. Mordant souhaite remercier le F.R.S-F.N.R.S (Fonds belge pour la recherche) pour le financement de sa thèse de doctorat (boursier FRIA). Des remerciements particuliers sont également adressés à Sergio Lagomarsino et Serena Cattari pour l'aide fournie dans TEMURI.

7. Bibliographie

- [BEY 13] BEYER C., MANGALATHU S., « Review of strength models for masonry spandrels », *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 11, 2013, p. 512-542.
- [COS 11] COSTA A. A., PENNA A., MAGENES G., « Seismic performance of Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Masonry: From Experimental Testing of the In-Plane Capacity of Walls to Building Response Simulation », *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 15, 2011, p. 1-31.
- [POR 10] DA PORTO F., GUIDI G., GARBIN E., MODENA C., « In-Plane Behavior of Clay Masonry Walls: Experimental Testing and Finite-Element Modeling », *Journal of Structural Engineering*, vol. 136, 2010, p. 1379-1392.
- [DEG 11] DEGÉE H., DENOËL V., CANDEIAS P., CAMPOS COSTA A., COELHO E., « Experimental investigation on the seismic behaviour of North-European masonry houses », *Actes de la 7^e Congresso de Sismologia e Engenharia Sismica (SISMICA)*, Porto, 26-28 septembre 2007.
- [DEP 10] DEPARTMENT FOR COMMUNITIES AND LOCAL GOVERNMENT, « English Housing Survey – Housing stock report 2008 », *National Statistics*, October 2010.
- [EC8 04] EN 1998-1-1: 2004, « Eurocode 8: Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1: Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments », Décembre 2004.
- [PAS 15] INTERNATIONAL PASSIVE HOUSE ASSOCIATION (N.D.), « Passive House », dernière visite le 25 mars 2016, www.passivehouse-international.org/index.php?page_id=78.
- [KAR 09] KARANTONI F.V., LIRANTZAKI F.N., « Seismic behaviour of “Simple Masonry Buildings” according to EN 1998 », *Actes de la 7th International Conference on Earthquake Resistance Engineering Structures*, Limassol, 11-13 mai 2009.
- [LAG 13] LAGOMARSINO S., PENNA A., GALASCO A., CATTARI S., « TREMURI program: an equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings », *Engineering Structures*, vol. 56, 2013, p. 1787-1799.
- [MAR 14] MARTENS D., « Thermal Break with Cellular Glass Units in Load-Bearing Masonry Walls », *Actes de la 9th International Masonry Conference (IMC)*, Guimaraes, 7-9 juillet 2014.
- [MOR 14] MORDANT C., DIETZ M., TAYLOR C., PLUMIER A., DEGÉE H., *Seismic behaviour of thin-bed layered unreinforced clay masonry shear walls including soundproofing elements*, Seismic Evaluation and Rehabilitation of Structures (chap. 6), eds Alper Ilki and Mochal N. Fardis, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering series Vol. 26, Springer International Publishing Switzerland 2014, 77-93
- [MOR 15a] MORDANT C., DENOËL V., DEGÉE H., « Timoshenko beam identification of unreinforced load-bearing masonry walls including soundproofing devices », *Journal of Engineering Mechanics*, (soumis en octobre 2015).
- [MOR 15b] MORDANT C., DENOËL V., DEGÉE H., « Comparison of experimental results and numerical modelling of unreinforced load-bearing masonry structures subjected to earthquake loading », *Actes de la SECED Conference*, Cambridge, 9-10 juillet 2015.
- [SOU 14] SOUSA L.C., SOUSA H., CASTRO C.F., ANTONIO C.C., SOUSA R., « A new lightweight masonry block: Thermal and mechanical performance », *Archives of civil and mechanical engineering*, vol. 14, p. 160-169.