

Modélisation du comportement des maçonneries en pierre par la méthode des éléments discrets : Développement d'un modèle de zone cohésive-frictionnelle en mode mixte I+II décrivant le comportement du joint

V. Venzal^{1,3}, T. Parent¹, F. Dubois², S. Morel¹

¹ Université de Bordeaux, UMR 5295, Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), 351 cours de la Libération, 33400 Talence, France (vincent.venzal@u-bordeaux.fr; thomas.parent@u-bordeaux.fr; stephane.morel@u-bordeaux.fr)

² Université de Montpellier, UMR 5508, Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC), 860 rue de St Priest, 34090 Montpellier, France (frederic.dubois@umontpellier.fr)

³ AIA Ingénierie, 10 rue Ariane – Bât C – 33700 Mérignac, France (v.venzal@a-i-a.fr)

RÉSUMÉ. Un modèle de zone cohésive-frictionnelle en mode mixte I+II (noté FCZM) est proposé pour décrire le comportement mécanique des interfaces bloc-mortier d'éléments maçonnés en pierre de taille appareillées et jointoyées au mortier de chaux. Ce modèle est implémenté dans le code de calcul aux éléments discrets LMGC90. Les paramètres cohésifs et frictionnels de ce modèle sont identifiés au moyen d'une campagne expérimentale mettant en œuvre les modes purs I et II à l'échelle de l'assemblage. Une confrontation numérique vs expérimentale est proposée à l'échelle 1/2 sur des murs sollicités en cisaillement sous charge verticale constante. Les réponses force horizontale vs. déplacement horizontal ainsi que les mécanismes de ruines sont comparés et discutés afin de valider la démarche de modélisation.

ABSTRACT. A frictional cohesive zone model in mixed mode I+II (noted as FCZM in the following), is proposed to describe mortar joint behavior in masonry elements composed of limestone blocs. This FCZM is implemented into the Discret Element Method (DEM) LMGC90 software (Non Smooth Contact Dynamic method, NSCD). Mechanical parameters of model are estimated from characterization tests in pure mode I and II carried out at assemblage scale. On this basis, DEM simulation is proposed on masonry walls (at half scale) by shear loading under normal stress. Finally, horizontal load vs. horizontal displacement responses and damage process are compared to validate the proposed modelling approach.

MOTS-CLÉS : modèle de zone cohésive-frictionnelle, méthode des éléments discrets, quasi-fragile, maçonnerie en pierre

KEYWORDS: frictional cohesive zone model, discret element method, quasi-brittle, limestone masonry

1. Introduction

La compréhension du comportement structurel des maçonneries traditionnelles constitue aujourd'hui un enjeu en matière de conservation du patrimoine architectural et de réhabilitation de bâtiments anciens. Les travaux présentés ici consistent à évaluer et simuler le comportement mécanique de murs maçonnés, composés de blocs calcaire appareillés et de joints minces réalisés au mortier de chaux hydraulique. Ces murs sont soumis à un effort de cisaillement sous charge verticale constante. Dans cette configuration, la rupture intervient principalement au niveau des interfaces pierre/mortier. La modélisation numérique doit donc être capable de gérer une grande collection de blocs interagissant par contact cohésifs et frictionnels au niveau des interfaces. Sur cette base, la méthode des éléments discrets et plus particulièrement la Non Smooth Contact Dynamic Method [JEA 99] semble particulièrement adaptée. Un modèle de zone cohésive-frictionnelle en mode mixte I+II, basé sur la description des deux principaux modes purs d'endommagement du joint : l'ouverture (mode I) et le glissement plan (mode II), a été développé et implémenté dans le code de calcul aux éléments discrets LMGC90 [DUB 11]. La méthodologie globale consiste dans un premier temps à identifier les paramètres cohésifs en modes purs I et II au moyen d'essais de caractérisation sur des blocs de pierre assemblés par joint de mortier. Dans un second temps, une validation du

modèle est proposée par comparaison au comportement expérimental de murs soumis au cisaillement sous charge verticale constante.

2. Modèle de zone cohésive-frictionnelle, description et identification expérimentale des paramètres

Une loi de mode mixte couplant les comportements frictionnel et cohésif des joints de mortier est proposée dans ce travail. Cette loi doit décrire les aspects expérimentaux observés dans une interface bloc/mortier à savoir : (i) l'écroissage négatif attendu dans la réponse contrainte-déplacement en mode I et en mode II, et la forte disparité relative à ces 2 modes et (ii) le couplage des comportements cohésif et frictionnel. Le modèle présente deux comportements distincts dépendant du signe de la contrainte normale : en traction la mixité est activée tandis qu'en compression seul l'endommagement en cisaillement est considéré et couplé au comportement frictionnel.

Traction et cisaillement : mode mixte I-II. Dans la littérature, plusieurs formes de lois cohésives sont proposées [DIM 15]. Cependant, les résultats expérimentaux montrent qu'une fonction exponentielle permet de décrire avec précision le comportement post-pic (Figure 2(a)). Dans cette étude, les comportements cohésifs de mode I et mode II sont décrits avec la même fonction exponentielle (Figure 1(a)) où $i = \{I, II\}$. Après le comportement élastique, décrit par la raideur initiale K_i^0 [N/m^3] et la résistance de traction ou de cisaillement σ_i^e [N/m^2], la contrainte σ_i ainsi que la raideur K_i diminuent progressivement, reflétant le comportement adoucissant de l'interface. La dégradation de la raideur K_i est pilotée par la variable d'endommagement d (variable scalaire) telle que $0 \leq d \leq 1$, où $d = 0$ correspond à une interface saine tandis que $d = 1$ reflète la rupture complète de l'interface. In fine, les trois paramètres cohésifs associés à chaque mode pure sont : la raideur initiale K_i^0 , la résistance σ_i^e et l'énergie cohésive G_{f_i} [J/m^2] où $i = \{I, II\}$.

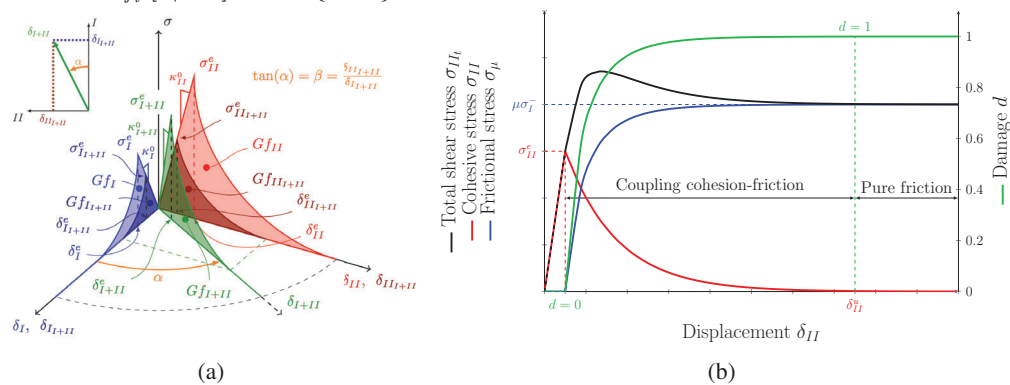


Figure 1. Modèle de zone cohésive (a) de mode I (bleu), de mode II (rouge) et de mode mixte I+II (vert), et (b) couplage cohésif-frictionnel du modèle de mode II

Dans les maçonneries, l'interface est généralement sollicitée simultanément en mode I et en mode II [ZUC 02], conduisant à un processus de rupture en mode mixte. De nombreux modèles ont été proposés pour décrire ce type de rupture complexe [BOS 06, SNO 13, BIS 19]. Ils sont généralement formulés à partir des lois cohésives des modes purs (I et II) et conduisent à l'expression d'une loi de mode mixte de la même forme que celle des modes purs (Figure 1(a)). Le taux de mixité est généralement obtenu sur la base d'un paramètre de couplage β correspondant au ratio du déplacement de la composante de cisaillement sur celle de traction, *i.e.*, $\beta = \delta_{II+II} / \delta_{I+II}$. La loi de mode mixte (en vert sur la figure 1(a)) est ensuite déterminée à l'aide de deux critères : un critère d'initiation de l'endommagement, exprimé à partir des contraintes élastiques limites et un critère de rupture formulé sur la base des énergies cohésives.

Compression et cisaillement : couplage du comportement cohésif et frictionnel. Lorsque l'interface est sollicitée en compression et cisaillement, la contribution du frottement doit être prise en compte par le modèle de zone cohésive. La plupart des modèles proposent une superposition de la partie cohésive et frictionnelle, mais cela conduit à une surestimation de l'énergie frictionnelle au détriment de l'énergie cohésive [FRE 17, BIS 19]. Dans le modèle proposé, ces deux comportements sont couplés via la variable d'endommagement d (Figure 1(b)), en émettant l'hypothèse que d permet une estimation de l'aire endommagée de l'interface. Le frottement intervient sur toute ou partie de l'aire endommagée et ce, dès l'initiation de l'endommagement (*i.e.*, $d \simeq 0$). La réponse en cisaillement + compression étant la somme des comportements cohésif et frictionnel, *i.e.* $\sigma_{II_i} = \sigma_{II} + \sigma_{\mu}$, le plateau de frottement est atteint lorsque l'interface est totalement endommagée ($d = 1$). Lors d'une sollicitation combinée de compression et cisaillement, deux paramètres supplémentaires doivent être identifiés, le coefficient de frottement μ ainsi qu'un paramètre p permettant d'ajuster la part de la surface endommagée de l'interface sur laquelle agira le comportement frictionnel au cours de l'endommagement de l'interface.

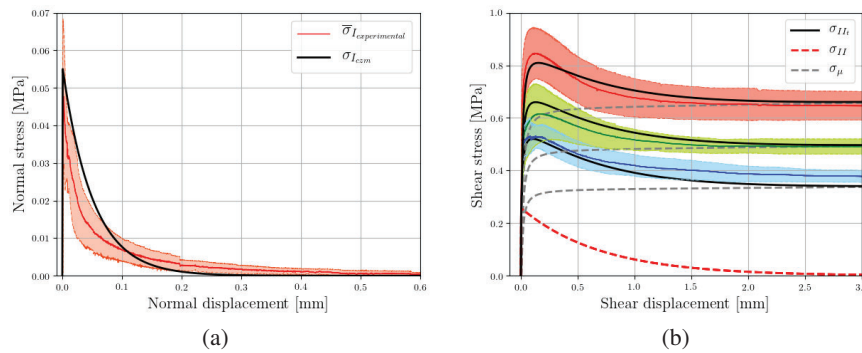


Figure 2. Réponses contrainte-déplacement expérimentales (a) du mode I et (b) du mode II

Identification des paramètres de la loi cohésive-frictionnelle. Les paramètres cohésifs de mode I sont estimés à partir d'un essai de traction sur deux pierres assemblées par un joint de mortier. Cet essai est asservi en déplacement d'ouverture du joint, estimé par l'intermédiaire de 4 extensomètres (HBM). La figure 2(a) montre les réponses expérimentales contrainte de traction vs l'ouverture du joint ainsi que la loi cohésive déterminée à partir de la moyenne des réponses expérimentales.

Les paramètres de mode II sont déterminés au moyen d'un essai de cisaillement sous contrainte normale au joint sur un triplet de pierres assemblées par deux joints de mortier. Trois paliers de contrainte normale ont été réalisés : 0.4 MPa, 0.6 MPa et 0.8 MPa. L'essai est asservi par rapport au déplacement de cisaillement plan entre la pierre centrale et les pierres d'extrémité. Les fuseaux expérimentaux contrainte de cisaillement vs du déplacement de cisaillement plan ainsi que les réponses du FCZM sont tracés en figure 2(b). Le coefficient de frottement moyen est déterminé par régression linéaire des contraintes résiduelles en fonction des contraintes normales appliquées aux joints tandis que les autres paramètres sont estimés par analyse inverse en ajustant (méthode des moindres carrés) le modèle aux fuseaux expérimentaux.

3. Validation du modèle : mur en cisaillement sous charge verticale constante

Afin d'évaluer la robustesse du modèle proposé, une campagne expérimentale à été réalisée sur 9 murs maçonnés ($1,80^L \times 0,15^l \times 1,20^h m^3$) sollicités en cisaillement plan sous charge verticale constante. Cet essai d'apparence simple mécaniquement, présente l'intérêt de mettre en œuvre l'ensemble des mécanismes de rupture d'interface présentés précédemment (traction pure, cisaillement pur, mode mixte et compression + cisaillement), fournissant ainsi une base conséquente de validation du modèle.

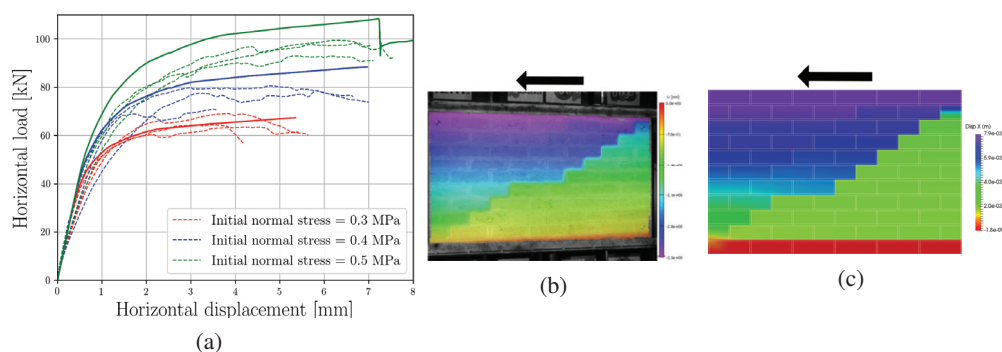


Figure 3. (a) Confrontation numérique vs expérimental des réponses force-déplacement. Champs de déplacements horizontaux : expérimentaux (b) et numériques (c)

Comportement expérimental. Les murs testés sont composés de blocs calcaire demi-dur ($R_c \simeq 11 MPa$) de $0,30^L \times 0,15^l \times 0,10^h m^3$, liaisons entre eux par des joints de mortier de chaux hydraulique NHL3.5, de 10 mm d'épaisseur. Le mur est encastré en pied par collage sur un profilé métallique. En tête de mur, l'effort de compression est appliqué par le biais d'un chevêtre de répartition à rouleaux permettant ainsi un degré de liberté en translation du mur. De plus, ce chevêtre possède un degré de liberté en rotation dans le plan. Trois taux de contrainte normale initiale aux joints ont été appliqués : 0.3, 0.4 et 0.5 MPa, et 3 murs sont testés par palier de contrainte. Le champ de déplacement (dans le plan et hors plan) du mur est mesuré tout au long de l'essai au moyen d'un dispositif de stéréo-corrélation. La figure 3(a) présente les courbes expérimentales force-déplacement

de cette campagne. Quelle que soit la contrainte normale appliquée, quatre phases ont été identifiées par la stéréocorrélation sur l'ensemble des murs : (i) une phase linéaire traduisant le comportement élastique du mur, (ii) une phase de non linéarité due à la propagation d'une fissure en pied de mur (au-dessus du premier lit de pierre), (iii) une fissuration en "escalier," plus ou moins prononcée en fonction de la contrainte normale appliquée (Figure 3(a)) et (iv) une rupture des blocs les plus sollicités en compression en fin d'essai. Il est observé que la résistance au cisaillement des murs est fortement dépendante de la contrainte normale.

Modélisation éléments discrets. La modélisation du mur par la MED comprend les hypothèses suivantes : (i) modélisation 2D, (ii) blocs étendus élastiques dont le module sera adapté pour correspondre à la raideur initiale moyenne de l'ensemble des murs testés et (iii) interface bloc/mortier simulé par le modèle de zone cohésive-frictionnelle renseigné par les paramètres mécaniques identifiés en première partie au moyen des essais de caractérisation en mode I et II. Les premières réponses résistance au cisaillement *vs* du déplacement horizontal en tête de mur sont présentées, pour chaque palier de contrainte normale, en figure 3(a). Les allures globales des réponses sont encourageantes. La confrontation des champs de déplacements expérimentaux et numériques (Figures 3(b) et 3(c)), permet de valider clairement les mécanismes de ruines observés expérimentalement. On notera toutefois une légère surestimation de la contrainte de cisaillement (sous $\sigma_N = 0.5 \text{ MPa}$) due à la non description de la rupture des blocs de pierre intervenant en fin d'essai.

4. Conclusion

Dans cette étude, un outil de calcul aux éléments discrets a été proposé afin de simuler un essai de cisaillement d'un mur composé de blocs calcaires liés par un mortier de chaux hydraulique. Un modèle de zone cohésive frictionnelle a été implémenté pour décrire finement le comportement non linéaire en mode I et II des joints de mortier (interfaces joint/bloc). L'identification des paramètres du FCZM est réalisée au moyen d'une campagne de caractérisation sur des assemblages. Enfin, la simulation numérique 2D par la MED de l'essai de cisaillement sous charge verticale constante d'un mur maçonné a été présentée et discutée. Les mécanismes de ruine observés ainsi que la résistance en cisaillement pour des contraintes normales faibles sont cohérents. Cependant, des améliorations doivent être apportées sur la résistance en cisaillement pour une contrainte de 0.5 MPa et sur l'enclenchement du deuxième mode de ruine (fissuration en escalier et rupture des blocs constaté expérimentalement).

Remerciements Les auteurs remercient la société AIA Ingénierie pour son soutien financier et plus particulièrement Alain Popinet et Maxime Le Deuff, ainsi que les sociétés TMH, CESA et DSM pour leur soutien technique. Ils remercient également Bernard Solbes pour son expertise scientifique et technique dans la mise en œuvre de la partie expérimentale de cette étude. Les essais expérimentaux ont été réalisés sur le plateau Xyloplate de l'EQUIPEX XyloForest (ANR-10-EQPX-16).

5. Bibliographie

- [BIS 19] BISOFFI-SAUVE M., MOREL S., DUBOIS F., « Modelling mixed mode fracture of mortar joints in masonry buildings », *Engineering Structures*, vol. 182, p. 316–330, mars 2019.
- [BOS 06] VAN DEN BOSCH M., SCHREURS P., GEERS M., « An improved description of the exponential Xu and Needleman cohesive zone law for mixed-mode decohesion », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 73, n° 9, 2006.
- [DIM 15] DIMITRI R., TRULLO M., DE LORENZIS L., ZAVARISE G., « Coupled cohesive zone models for mixed-mode fracture : A comparative study », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 148, p. 145–179, novembre 2015.
- [DUB 11] DUBOIS F., JEAN M., RENOUF M., MOZUL R., MARTIN A., BAGNERIS M., « Lmgc90 », *10e colloque national en calcul des structures*, 2011.
- [FRE 17] FREDDI F., SACCO E., SERPIERI R., « An enriched damage-frictional cohesive-zone model incorporating stress multi-axiality », *Meccanica*, p. 1–20, octobre 2017.
- [JEA 99] JEAN M., « The non-smooth contact dynamics method », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 177, n° 3–4, p. 235-257, 1999.
- [SNO 13] SNOZZI L., MOLINARI J.-F., « A cohesive element model for mixed mode loading with frictional contact capability : A COHESIVE ZONE MODEL FOR MIXED MODE LOADING WITH FRICTIONAL CONTACT », vol. 93, n° 5, 2013.
- [ZUC 02] ZUCCHINI A., LOURENÇO P. B., « A micro-mechanical model for the homogenisation of masonry », *International Journal of Solids and Structures*, vol. 39, n° 12, p. 3233–3255, juin 2002.