

---

---

# Modélisation discrète d'un mur maçonné sollicité en cisaillement sous chargement normal

V. Venzal<sup>1,3</sup>, T. Parent<sup>1</sup>, F. Dubois<sup>2</sup>, S. Morel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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)

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

<sup>3</sup> AIA Ingénierie, 10 rue Ariane – Bât C – 33700 Mérignac, France

---

*RÉSUMÉ.* Les travaux de recherche présentés ici ont pour objectif de simuler le comportement mécanique d'un mur de pierres calcaires appareillées soumis à un effort de cisaillement sous chargement normal constant. Dans cette optique, un modèle de zone cohésive, implémenté dans le code de calcul aux éléments discrets LMGC90, est utilisé. Ce dernier permet la prise en compte des non-linéarités en mode I et II observées au niveau des joints de mortier et de leurs interfaces. La démarche proposée consiste tout d'abord à identifier les paramètres de la loi cohésive en mode I et II au moyen d'une campagne expérimentale originale de caractérisation, sur des matériaux pierre et mortier identiques à ceux utilisés pour construire le mur testé. Ensuite, ces paramètres mécaniques sont exploités dans une simulation numérique de l'essai de cisaillement du mur par la Méthode des Éléments Distincts (MED). Enfin, les résultats numériques et expérimentaux sont confrontés et analysés. Bien que la raideur soit surévaluée, les résultats de cette étude montrent que l'effort horizontal à la rupture et le mode de ruine du mur par glissement sur le premier lit de mortier, sont correctement appréhendés par la démarche de modélisation proposée.

*ABSTRACT.* The aim of this paper is to simulate mechanical behavior of a limestones wall submitted to shearing, under constant normal load. With this in mind, a cohesive zone model implemented in discrete element code LMGC90 is used. This one cohesive zone model allows the non linear behavior of the mode I and II noticed at the mortar joints and theirs interfaces to be taken into account. This approach consists in identifying the cohesive law mode I and mode II parameters by making a characterization tests on the same limestone and mortar used on the wall tested. Then, the identified machanical parameters are exploited in a numerical simulation of the shearing test carried out on the wall by Discret Element Method (DEM). Finally, the numerical and experimental outcomes are confronted and analysed. Although the stiffness is overrated, the outcomes shows that the breaking horizontal load and the first mortar bed sliding decay mode, are corretly apprehended on this approach.

*MOTS-CLÉS :* maçonnerie, méthode des éléments distincts, joint de mortier, modèle de zone cohésive, caractérisation expérimentale

*KEYWORDS:* masonry, discret element method, mortar joint, cohesive zone model, experimental characterization

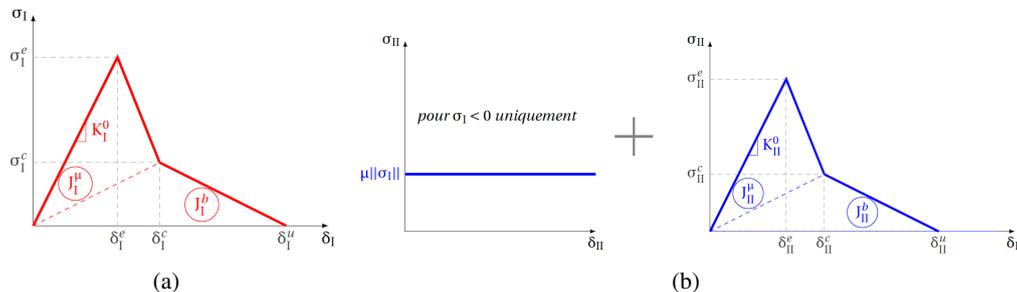
---

## 1. Introduction

Aujourd'hui, la compréhension du comportement structurel des maçonneries traditionnelles reste un enjeu en matière de conservation du patrimoine architectural et de réhabilitation de bâtiments anciens. Dans cet objectif, le travail de recherche consiste à modéliser numériquement le comportement mécanique d'un mur appareillé de pierres calcaires jointoyées au mortier de chaux et soumis à un effort de cisaillement sous chargement normal. La maçonnerie met en œuvre des matériaux de nature quasi-fragile dont la variabilité des propriétés mécaniques et la complexité du processus de rupture rendent délicate la modélisation d'ouvrages maçonnés. On compte dans la littérature 2 stratégies de modélisation afin de décrire le comportement des maçonneries [LOU 96][ACA 01] : (i) la méthode des éléments finis et (ii) la méthode des éléments discrets. La présente étude utilise la seconde méthode et plus particulièrement la méthode dite Non Smooth Contact Dynamics [JEA 99]. Celle-ci semble en effet plus adaptée pour la simulation du comportement mécanique d'un ensemble de corps rigides, interagissant par contact cohésif et frictionnel. Après la présentation du modèle cohésif-frictionnel, décrivant le comportement des joints de mortier avec leurs interfaces en mode I et II, les paramètres alimentant cette loi cohésive seront décrits et identifiés au moyen d'une campagne expérimentale de caractérisation. Enfin, une modélisation d'un essai mené sur un mur simple soumis au cisaillement sera présentée et la confrontation entre la simulation numérique et les résultats expérimentaux sera analysée.

## 2. Loi cohésive frictionnelle rendant compte du comportement des joints et identification des paramètres de la loi cohésive des modes I et II

Le modèle de zone cohésive développé permet de reproduire le comportement quasi-fragile du mortier et de ses interfaces avec les blocs [BIS 16]. Il se caractérise par un endommagement progressif avant rupture, approximé ici par une loi bilinéaire. Les modes purs I et II sont identifiés de manière distinctes (voir figure 1), et le modèle prend en compte la mixité des modes à travers un ratio de déplacement. Les paramètres d'entrée de la loi en mode I et en mode II sont : (i) la raideur initiale  $K_i^0$ , (ii) la contrainte maximale marquant la fin du domaine élastique  $\sigma_i^e$ , (iii) l'énergie cohésive  $J_i^c = J_i^\mu + J_i^b$ , (iv) la distribution entre les énergies cohésives de microfissuration et de pontage de fissure  $\Phi = J_i^\mu / J_i^c$  et (v) le déplacement ultime  $\delta_i^u$ . L'approximation de cet adoucissement permet de mettre en évidence les deux principaux phénomènes du processus de rupture quasi-fragile qui sont, la microfissuration (noté  $\mu$ ) et le pontage de fissure (noté  $b$ ). La dégradation de la raideur est décrite par la variable d'endommagement

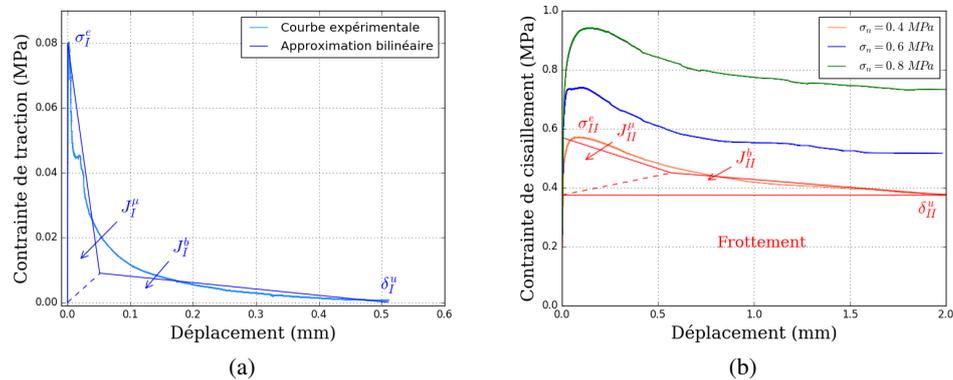


**Figure 1.** Représentation de la loi cohésive frictionnelle (a) en mode I et (b) en mode II, BISOFFI-SAUVE (2016)

$d = K/K^0$ , évoluant de 1 pour une interface intacte ( $K = K^0$ ), à 0 pour une interface rompue ( $K = 0$ ). De plus, la loi cohésive de Mode II tient compte du seuil de glissement de Coulomb (voir figure 1(b)), *i.e.*, il est nécessaire de vaincre le frottement avant de pouvoir endommager l'interface. Deux critères permettent de définir la mixité des modes, un critère d'initiation de l'endommagement et un critère de rupture. Le premier marque la fin du comportement élastique. Il est exprimé en contraintes sous la forme d'un critère quadratique formulé en fonction des limites élastiques des deux modes purs. Le deuxième, exprimé en énergie, caractérise l'énergie nécessaire à la rupture complète de l'interface.

**Essai de traction pure** Les paramètres cohésifs de mode I sont estimés à partir d'un essai de traction sur un assemblage de 2 pierres par un joint de mortier. Durant l'essai, les pierres sont encastrées par le biais d'équipages supérieurs et inférieurs et l'essai de traction est asservi en déplacement d'ouverture du joint, estimé par l'intermédiaire de 4 extensomètres (HBM). Pour chaque essai, la courbe contrainte de traction vs l'ouverture du joint est tracée (voir figure 2(a)). La réponse indique un premier régime linéaire correspondant au domaine élastique du

joint, suivi par une phase adoucissante caractérisant l'endommagement progressif joint/pierre au niveau de l'interface jusqu'à la rupture totale. L'ensemble des paramètres cohésifs est obtenu par lecture directe de l'approximation bilinéaire.



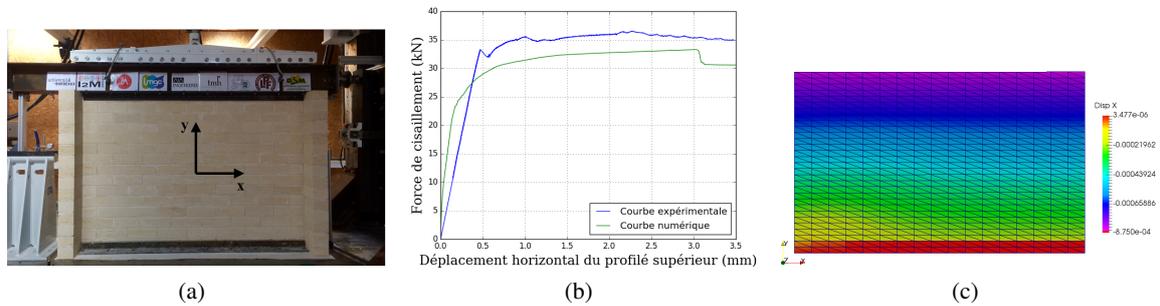
**Figure 2.** Réponses contrainte-déplacement expérimentales (a) du mode I et (b) du mode II

**Essai de cisaillement pur** Les paramètres du mode II sont déterminés au moyen d'essais de cisaillement sur un triplet de pierres assemblées par 2 joints de mortier. Durant l'essai, les 2 pierres d'extrémité sont considérées comme encastées et une sollicitation parallèle aux joints est appliquée à la pierre centrale. La campagne expérimentale comprend trois paliers de contrainte normale : 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. Pour chaque essai, la réponse contrainte de cisaillement vs du déplacement de cisaillement plan est tracée en figure 2(b). Les courbes présentent un palier (notée  $\sigma_{res}$ ) dû au frottement pour de grandes valeurs de déplacements, qui diffère en fonction de la contrainte normale aux joints (noté  $\sigma_N$ ). Elles peuvent donc être décomposées en termes de frottement et de comportement cohésif. Le comportement frictionnel est retranché du comportement total observé expérimentalement. L'ensemble des paramètres cohésifs est déterminé en suivant une démarche identique à celle utilisée pour le mode I. Le protocole expérimental fait l'objet d'une demande de brevet d'invention N° 1656779.

### 3. Essai expérimental d'un mur maçonné sous chargement normal constant et simulation numérique

Le mur testé est composé de blocs calcaire demi-dur de  $0,30^L \times 0,15^l \times 0,10^h \text{ m}^3$ , liaisonnés entre eux par des joints de mortier de chaux hydraulique NHL3.5, de 10 mm d'épaisseur (voir figure 3(a)). Les dimensions totales du mur sont : 2.65 m de long, 1.65 m de haut et 0.15 m d'épaisseur. Aux extrémités latérales du mur, des refends de 0.6 m sont mis en œuvre. Ils assurent des conditions limites latérales prenant en compte le fait qu'un mur est rarement libre. En tête de mur, l'effort de compression est appliqué par le biais d'un profilé métallique. Des cornières sont collées en pied et en tête de mur afin d'encasturer le mur au banc de structure et au profilé supérieur. Les paliers de chargement du mur sont : (i) effort vertical de 30 kN appliqué progressivement au moyen d'un chevrete de répartition et maintenu constant et (ii) déplacement horizontal imposé en tête de mur dans son plan. Premièrement, une phase linéaire est observée jusqu'à un déplacement de 0,4 mm environ. La raideur associée à cette phase est d'environ 80 kN/mm. Ensuite, une chute d'effort est observée et correspond à l'apparition d'une fissure se propageant le long du premier lit de mortier de la droite vers la gauche. La troisième phase, présentant un effort horizontal relativement constant, correspond au glissement du mur au niveau de ce premier lit. Les cycles de décharge durant cette phase soulignent deux non linéarités structurelles distinctes : (i) diminution de la raideur horizontale du mur et (ii) déplacements résiduels irréversibles. Enfin, l'effort de rupture est mesuré à 36 kN pour un déplacement de 2.3 mm.

**Modélisation de l'essai de cisaillement du mur** La modélisation du mur par la MED comprend les hypothèses suivantes : (i) mur 2D, (ii) joints de mortier réduits à une épaisseur nulle, modélisés par une interface cohésive et frictionnelle de raideur infinie et (iii) blocs étendus élastiques de raideur issue d'une homogénéisation linéaire d'un VER de maçonnerie. La simulation numérique est réalisée en 2D avec le code de calcul aux éléments discrets LMGC90 [DUB 03], dans lequel est implémenté le modèle cohésif-frictionnel en mode mixte présenté précédemment. Le bâti et le profilé supérieur sont réalisés en éléments rigides. Les encastresments sont assurés par un couplage des déplacements entre le mur et les éléments rigides supérieurs et inférieurs. Dans un premier



**Figure 3.** (a) Photographie du mur maçonné, (b) confrontation expérimental vs numérique et (c) champs de déplacements horizontaux de la simulation numérique (en m) pour  $F_y = 31 \text{ kN}$

temps, l'effort normal de 30 kN est appliqué sur le profilé supérieur. Ensuite le déplacement horizontal du profilé est imposé (même protocole que l'essai expérimental) en maintenant l'effort vertical constant.

La courbe présentée en figure 3(b), montre la réponse force horizontale vs déplacement horizontal obtenue par la simulation numérique. On constate une force au pic de 33 kN, contre 36 kN constatée expérimentalement. La simulation numérique conduit donc à une bonne estimation de l'effort de rupture. La raideur numérique initiale est de 120 kN/mm, contre 80 kN/mm constatée expérimentalement. Cet écart trouve sans doute son origine dans le fait que numériquement les caractéristiques mécaniques des joints et des pierres sont homogènes alors que ces dernières sont vraisemblablement assez dispersées dans un mur maçonné. Enfin, le tracé des déplacements horizontaux après rupture (voir figure 3(c)), met en évidence le mode de ruine par glissement sur le premier lit observé expérimentalement. La fissure se propage au-dessus du premier lit de pierre *i.e.*, dans le premier joint, tandis que le reste du mur glisse horizontalement. On observe également sur cette figure que le mur conserve une certaine élasticité, qui se traduit par un déplacement horizontal plus important en tête de mur (application de la charge) qu'en pied de mur.

#### 4. Conclusion

Un outil de calcul aux éléments discrets a été présenté dans le but 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 a été introduit afin de retranscrire finement le comportement non linéaire en mode I et II de l'ensemble joint de mortier + interfaces (joint/bloc). L'identification des paramètres de la loi cohésive est réalisée au moyen d'essais de caractérisation sur assemblages. Enfin, la simulation numérique 2D par la MED de l'essai de cisaillement a été présentée et discutée. Le profil de rupture ainsi que la force à la rupture sont cohérents avec les résultats expérimentaux. Cependant, la raideur horizontale initiale est surévaluée par la modélisation.

**Remerciements** L'ensemble des travaux présentés ont été menés grâce à la participation de la société AIA Ingénierie, ainsi que des entreprises TMH (Restauration du patrimoine ancien), CESA (Chaux & Enduits de Saint Astier) et DSM (Doyeux Sablières Montponnaises). Les essais expérimentaux ont été réalisés sur le plateau Xyloplate de l'EQUIPEX XyloForest (ANR-10-EQPX-16).

#### 5. Bibliographie

- [ACA 01] ACARY V., Contribution à la modélisation mécanique et numérique des édifices maçonnés, PhD thesis, Université de la Méditerranée-Aix-Marseille II, 2001.
- [BIS 16] BISOFFI-SAUVE M., Etude des ouvrages maçonnés en pierre par la méthode des éléments discrets : caractérisation et modélisation du comportement cohésif des joints, PhD thesis, Université de Bordeaux, 2016.
- [DUB 03] DUBOIS F., JEAN M., « LMGC90 une plateforme de développement dédiée à la modélisation des problèmes d'interaction », *Actes du sixième colloque national en calcul des structures*, vol. 1, p. 111–118, 2003.
- [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.
- [LOU 96] LOURENCO P. B., Computational strategies for masonry structures, PhD thesis, TU Delft, Delft University of Technology, 1996.