

Modèle de zones cohésives pour les maçonneries

A. Boukham¹, F. Dubois², T. Parent¹, J.C. Mindeguia¹, S. Morel¹

¹ I2M, Université de Bordeaux, {ali.boukham,thomas.parent,jean-christophe.mindeguia,stephane.morel}@u-bordeaux.fr

² LMGC, Univ. Montpellier, CNRS, frederic.dubois@umontpellier.fr

Résumé — Dans cette présentation nous souhaitons présenter une méthode de calcul des structures maçonnées utilisant un modèle de zones cohésives frottantes. Ce modèle ainsi que sa calibration et son utilisation seront détaillés. La méthode par éléments discrets utilisée pour simuler le problème sera elle aussi détaillée. Diverses applications seront présentées.

Mots clés — Méthode de zones cohésives frottantes, Méthode par éléments discrets, Dynamique non régulière, LMGC90, Maçonnerie.

1 Introduction

Les constructions en maçonnerie occupent une part importante du parc immobilier bâti, des ouvrages du génie civil et du patrimoine, que ce soit en France, en Europe ou dans le reste du monde. Par ailleurs cette technique constructive, à l'heure de la décarbonation de la construction, connaît un regain d'intérêt, malgré un cadre réglementaire assez strict. L'importance d'intensifier le développement de la connaissance du comportement de ces structures est donc essentielle, à la fois pour l'évaluation des structures du génie civil existantes mais aussi pour la préservation du patrimoine culturel, compte tenu de la présence de forts risques sismique, climatique, incendie, etc.

Les outils de simulation sont de bons candidats pour analyser et comprendre le fonctionnement des structures maçonnées. Hormis les approches "simplifiées" (empiriques, graphiques, analytiques, etc) il existe deux types d'approches principales pour décrire le comportement de la maçonnerie :

- l'approche continue qui suppose la description du comportement de la maçonnerie avec un modèle homogène continu (CHM) basé sur une technique d'homogénéisation par exemple [1, 2]. Dans ce type de modèle, la réponse non linéaire repose sur de la plasticité et/ou de l'endommagement en différenciant les comportements en traction et en cisaillement/compression.
- l'approche bloc à bloc (BBM) avec une description géométriques des blocs et des joints de la maçonnerie en tenant compte des interactions mécaniques entre ces blocs. Les endommagements et les motifs de fissuration apparaissant dans la structure sont pris en compte au niveau de l'interface entre blocs.

2 Méthodes bloc à bloc

Nous nous intéressons ici aux modèles numériques conçus sur la base d'une discrétisation bloc à bloc de la maçonnerie et d'un modèle d'interaction qui décrit le contact entre blocs imitant le comportement frictionnel et cohésif de l'interaction bloc-bloc. Il existe différentes variantes de ces approches, basées essentiellement soit sur une approche éléments finis avec éléments joints soit sur approche éléments discrets avec des lois d'interaction ad-hoc. Nous nous intéresserons essentiellement à cette deuxième catégorie de méthodes. Généralement, les blocs sont considérés comme rigides, même s'ils peuvent également être considérés comme déformables et modélisés par éléments finis. Le comportement des joints de mortier et les interfaces bloc/mortier sont regroupés dans un modèle de contact cohésif frictionnel (FCZM). La méthode par éléments discrets permet de modéliser la vie de l'ouvrage de l'initiation des défauts à la ruine, en permettant déplacements, rotations et détachement complet des blocs [3]. Ces grands mouvements sont rarement pris en compte (et généralement négligés) dans les modèles FEM [4].

L'approche hybride combinant la DEM à une modélisation FEM des blocs permet de traiter de manière plus fine l'évaluation numérique de structures maçonnées complexes mais à un coût de calcul très élevé.

Dans les approches DEM la dynamique de chaque corps est évaluée en tenant compte des interactions avec les corps voisins. La marche en temps est conduite par une méthode pas à pas qui gère toutes les interactions sur un pas de temps arbitrairement fixé. L'originalité de notre approche est d'utiliser des modèles d'interaction non régularisés et un intégrateur en temps implicite. Cette approche à même de gérer la non régularité des solutions a été proposée par Moreau et Jean [5, 6].

Le système global, constitué de tous les blocs interagissant par interactions, est résolu à l'aide de la méthode Non-Smooth Contact Dynamics (NSCD) [7], qui est la base même du logiciel LMGC90 [8].

3 Loi d'interaction

Dans notre approche le comportement de l'interface entre blocs est décrit par du contact cohésif frictionnel, avec une évolution exponentielle décroissante de la cohésion due à l'endommagement progressif du matériau quasi-fragile [9]. Dans ce travail un ressort linéaire est ajouté pour reproduire le comportement du joint de mortier [11]. En effet, dans nos travaux précédents, la rigidité de l'interface (en mode I et II) n'était là que pour calculer la contrainte cohésive, sans avoir de sens physique. La rigidité du mortier était prise en compte en adaptant les modules (Young et cisaillement) des blocs, ce qui introduisait un certain nombre de biais. Le modèle a donc été enrichi d'un ressort déformable linéaire en série avec une interface cohésive avec contact unilatéral et frottement (Figure 1). La rigidité linéaire (normale et tangentielle) du ressort est calibrée avec les paramètres matériau du mortier et son épaisseur. Cette rigidité peut être dégradée avec un paramètre d'endommagement arbitraire d_{spring} qui n'évolue pas en cours de simulation; cet endommagement est généralement dû à la mise en place de la structure (retraits empêchés, etc). Comme précédemment la rigidité de l'interface cohésive est arbitrairement grande (pour ne pas perturber la rigidité apparente de la structure) et sera dégradée jusqu'à rupture lors de la sollicitation via la variable d'endommagement d_{coh} .

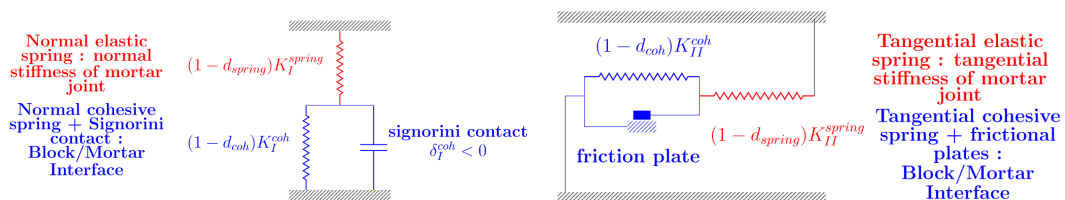


FIGURE 1 – FCZM spring : modèle rhéologique

La figure 2 donne l'évolution de la résistance totale de l'interface en mode I et II en détaillant la contribution de la rigidité linéaire (spring) et de la rigidité de l'interface cohésive (FCZM).

Afin de reproduire le comportement du joint en cisaillement, nous pouvons tenir compte d'un couplage entre frottement et endommagement : $\mu = d_{coh}^p \bar{\mu}$; où $\bar{\mu}$ est le coefficient de frottement après rupture totale du joint, d_{coh} la variable d'endommagement et p un coefficient calibré à partir des résultats expérimentaux. Figure 3 nous avons décomposé les différentes contributions (élasticité endommageable - frottement) sur la résistance au cisaillement.

La mixité du chargement de l'interface est gérée par un critère quadratique en contraintes pour l'initialisation de l'endommagement et un critère linéaire en énergie pour la dissipation de l'énergie cohésive [12].

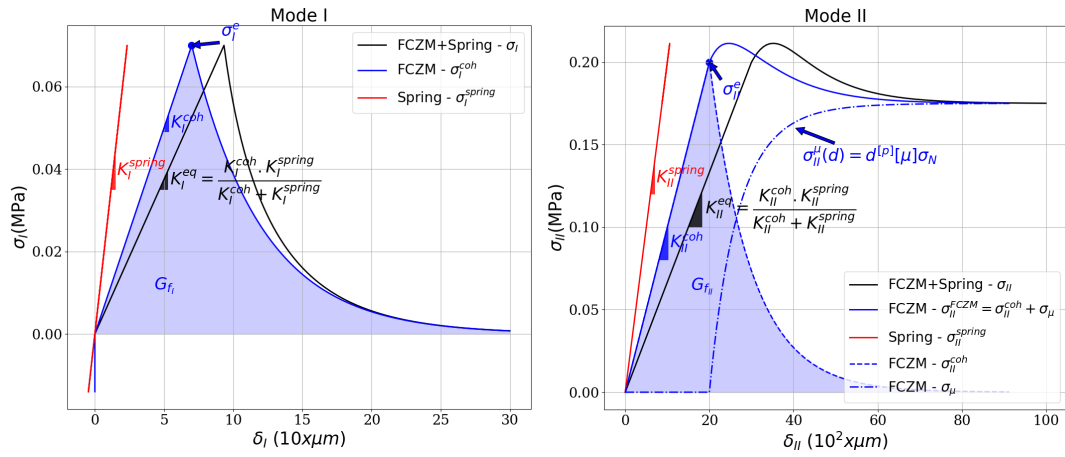


FIGURE 2 – FCZM spring : réponses en mode I et II

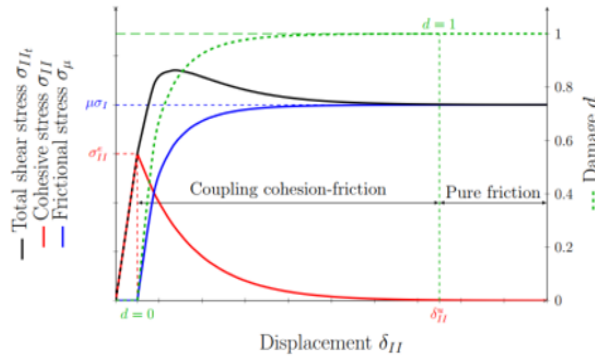


FIGURE 3 – FCZM : couplage frottement endommagement

4 Applications

4.1 Mur en compression cisaillement

Afin d'illustrer le comportement du modèle présenté précédemment nous allons nous appuyer sur des résultats expérimentaux obtenus au laboratoire I2M lors de la thèse de Vincent Venzal [12]. Lors de ces tests, des murs ont été soumis à des cycles de cisaillement horizontaux sous chargement vertical constant (voir figure 4).

Lors de ces tests la réponse de la structure (force horizontale versus déplacement horizontal) est illustrée figure 4.

Les paramètres de l'interface (contrainte au pic, énergie, etc) ont été identifiés avec des essais sur doublets (mode I) et triplets (mode II) comme détaillé dans la thèse de Venzal [12].

Pour réaliser ce calcul nous avons considéré une structure avec des blocs élastiques et des joints au comportement décrit précédemment. Afin de retrouver la rigidité initiale de la structure mesurée expérimentalement il nous a fallu introduire un endommagement initial de la rigidité linéaire du joint et de l'interface cohésive joint/bloc : $d_{spring0} = 0.968$; $d_{coh0} = 0.99944$ [11]. La figure 4 illustre la réponse du modèle. Hormis l'introduction de l'endommagement initial, on constate qu'avec les paramètres déterminés sur des tests essais élémentaires le modèle permet de bien reproduire le comportement de la structure.

Dans cette approche, comme les blocs sont considérés élastiques, on ne peut pas reproduire l'écrasement des blocs observé lors des expérimentations. Pour ce faire, la stratégie hybride DEM-FEM peut être enrichie en modélisant les blocs à l'aide d'un modèle non linéaire comme expliqué dans [10].

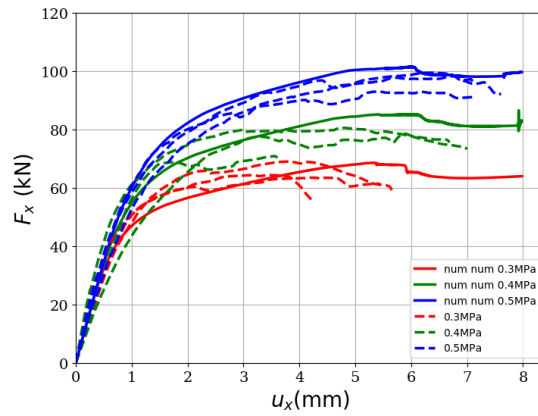


FIGURE 4 – Mur : résultats numériques

4.2 Voûte sous chargement sismique (Sera)

Nous nous intéressons ici à la résistance d'une voûte soumise à un séisme. Cet exemple a été proposé dans le cadre de SERA (Seismology and Earthquake Engineering Research Infrastructure Alliance for Europe) comme un test à l'aveugle auquel un certain nombre d'équipes ont répondu [13, 14].

Dans cet exemple nous avons utilisé des blocs rigides, et en nous basant sur [15] nous avons calculé K_I^{spring} et K_{II}^{spring} de façon à retrouver la rigidité apparente de la structure :

$$K_I^{spring} = \frac{E_u E_m}{t_m (E_u - E_m)} \quad K_{II}^{spring} = \frac{G_u G_m}{t_m (G_u - G_m)} \quad (1)$$

où E_u et E_m (resp. G_u et G_m) sont le module d'Young (resp. module de cisaillement) de la brique et du mortier, et t_m l'épaisseur du joint de mortier.

La géométrie de la structure et des détails sur le modèle de calcul sont donnés figure 5.

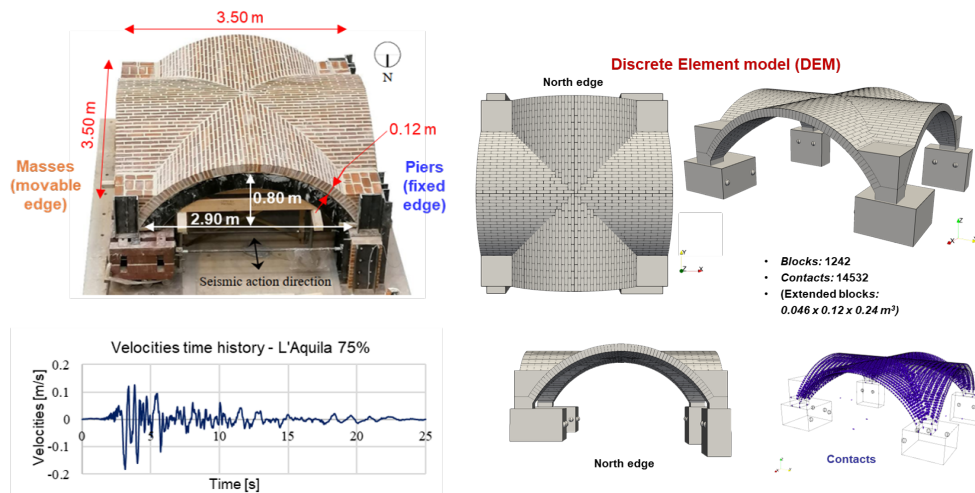


FIGURE 5 – Sera : Dispositif expérimental et modèle de calcul

La figure 6 donne certains des faciès de rupture observés après chargement. La figure 7 donne plusieurs représentations du comportement de la structure (déplacements et ouverture des joints, endommagement dans les joints, formation de rotules) observés au pic du séisme. Les résultats numériques obtenus sont très proches des résultats expérimentaux et sont détaillés dans [16].

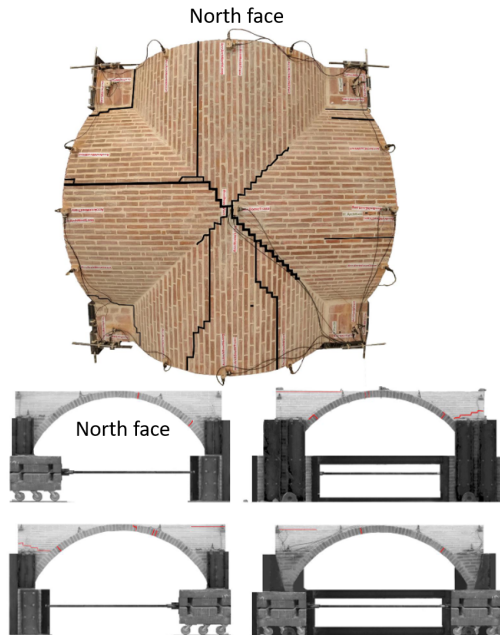


FIGURE 6 – Sera : faciès de rupture

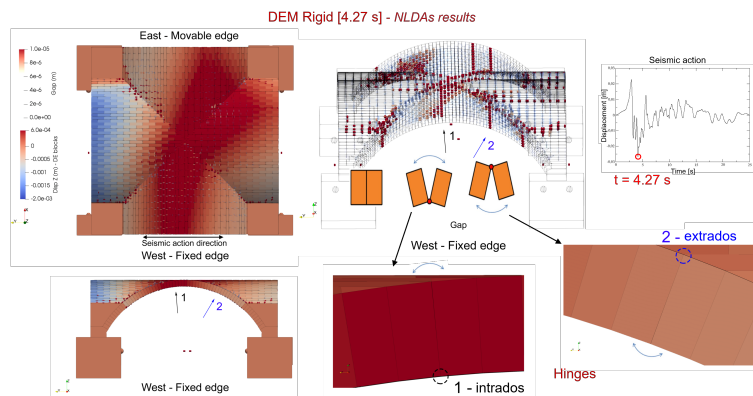


FIGURE 7 – Sera : résultats numériques

5 Conclusion

Nous avons présenté ici un modèle et une approche numérique qui nous semble adaptés à la simulation des structures maçonnées, ils se basent sur :

- une description bloc à bloc de la structure résolue par une méthode aux éléments discrets (blocs rigides ou déformables),
- un modèle d'interaction de type zone cohésive frottante permettant de représenter le comportement de l'interaction bloc-bloc : rigidité du joint en traction et compression ainsi que le comportement quasi-fragile et le frottement.

Lors de la présentation les limitations de ce modèle (comportement à des chargements cycliques, temps de calcul, etc) seront abordées ainsi que les pistes d'amélioration envisagées (endommagement et plasticité, éléments finis joints, etc).

Remerciements

Une partie de ce travail a été menée dans le cadre du projet de recherche DEMMEFI (ANR-20-CE22-0004) financé par l'Agence Nationale de la Recherche. Les calculs de l'exemple SERA ont été menés en collaboration avec Angela Ferrante (LMGC) et Pierre Morenon (LMDC).

Références bibliographiques

Références

- [1] Sellier A., Casaux-Ginestet G., Buffo-Lacarrière L., Bourbon X. *Orthotropic damage coupled with localized crack reclosure processing. Part I : Constitutive laws*, Eng. Fract. Mech. 97, 148–167, 2013
- [2] Sellier A., Morenon P., Domède N. *Computational performances optimization of a mechanical behaviour model for geomaterials*, in : RUGC, 2022.
- [3] Clementi F., Lenci S., Ferrante A., Giordano E., Dubois F. *Damage assessment of ancient masonry churches stroked by the Central Italy earthquakes of 2016 by the non-smooth contact dynamics method*, Bulletin of Earthquake Engineering, 2019
- [4] Pegon P., Anthoine A. *Numerical Strategies for Solving Continuum Damage Problems Involving Softening : Application to the Homogenization of Masonry*, Computers & Structures, 64, 1–4, pp. 143–157, 1994
- [5] Jean M. *The non-smooth contact dynamics method*, Comput. Methods Appl. Mech. Eng, 177, 235–257, 1999.
- [6] Moreau J.J. *Unilateral Contact and Dry Friction in Finite Freedom Dynamics*, Nonsmooth Mechanics and Applications, Springer Vienna, Vienna, pp. 1–82, 1988.
- [7] Dubois F., Acary V., Jean, M. *The Contact Dynamics method : A nonsmooth story*, Comptes Rendus Mécanique 346, 247–262, 2018
- [8] Dubois F., Jean M. *The non smooth contact dynamic method : recent LMGC90 software developments and application*, Wriggers, P., Nackenhorst, U. (eds) Analysis and Simulation of Contact Problems, Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, vol 27. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [9] Venzal V., Morel S., Parent T., Dubois F. *Frictional cohesive zone model for quasi-brittle fracture : Mixed-mode and coupling between cohesive and frictional behaviors*, Int. J. Solids Struct., 198, 17–30, 2020.
- [10] Boukham A., Venzal V., Parent T., Morel S., Dubois F., Solbes B. *3D Hybrid Modelling Approach Combining the Finite and Discrete Element Methods Of a Masonry Wall Subjected to a Compressive Shear Loading*, IJSS, 2023.
- [11] Boukham A., Parent T., Morel S., Dubois F., Mindeguia J.C. *Discrete element modelling of a masonry wall subjected to shear with taking into account the damage of blocks*, AJCE, vol. 41(1), 177-186, 2023.
- [12] Venzal V. *Modélisation discrète du comportement mécanique des ouvrages maçonnés en pierre. Aspects expérimentaux - Analyse énergétique*, thèse de l'Université de Bordeaux, 2020.
- [13] Bianchini N., Calderini C., Mendes N., Candeias P., Lourenço P.B. *Blind Prediction Competition - Sera.ta - Seismic Response of Masonry Cross Vaults : Shaking table tests and numerical validations (Version 1)*, data set, 2023.
- [14] Bianchini N., Calderini C., Mendes N., Candeias P., Lourenço P.B. *Postdiction Competition - Sera.ta - Seismic Response of Masonry Cross Vaults : Shaking table tests and numerical validations (Version 1)*, data set, 2023.
- [15] Lourenço P.B., Rots J.G. *Multisurface Interface Model for Analysis of Masonry Structures*, J. Eng. Mech, 123, 660–668, 1997.
- [16] Ferrante A., Dubois F., Morenon P. *Toward a hybrid FEM-DEM modeling strategy for structural assessment of Cultural Heritage masonry*, to appear in IJAH.