HAL open science

Modèles d'interface endommageable pour les maçonneries

Fazia Fouchal, Céline Pelissou, Frédéric Lebon, Isabelle Titeux

To cite this version:

Fazia Fouchal, Céline Pelissou, Frédéric Lebon, Isabelle Titeux. Modèles d'interface endommageable pour les maçonneries. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-00459666

HAL Id: hal-00459666

https://hal.science/hal-00459666v1

Submitted on 4 Jul 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modèles d'interface endommageable pour les maçonneries

Fazia Fouchal, Céline Pelissou, Frédéric Lebon & Isabelle Titeux

CNRS, Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique
31 chemin Joseph-Aiguier
13402 Marseille Cédex 20
lebon@lma.cnrs-mrs.fr

Résumé :

Nous nous intéressons à la modélisation de l'endommagement dans les interfaces briques-mortier dans les murs de maçonneries. A l'aide d'une étude expérimentale préliminaire, nous avons déduit le comportement mécanique macroscopique de l'interface et utilisé le modèle RCCM avec le code LMGC90 pour étudier ce comportement. Le modèle n'étant pas suffisamment pertinent pour le problème considéré, nous avons choisi de développer un nouveau modèle, le modèle asymptotique GL-PL, basé sur des techniques d'homogénéisation et implanté dans le code GYPTIS.

Abstract :

We are interested to the damage modelling of the brick/mortar interfaces for masonry walls. With the help of a preliminary experimental study, we have deduced the macroscopic mechanical behaviour of the interface and used the RCCM model with the LMGC90 software in order to study this behaviour. Nevertheless, the RCCM model is not enough relevant for the considered problem. So we choose to develop a new model, the GL-PL asymptotical model, based on homogenization techniques and incorporated in the Gyptis software.

Mots-clefs :

Interface, endommagement, maçonnerie

1 Introduction

Ce travail est une contribution à la modélisation des interfaces dans les structures maçonnées constituées de briques et de mortier. Si l'on veut déterminer avec précision de tels modèles, il est nécessaire d'obtenir expérimentalement des données précises des caractéristiques mécaniques des différents constituants intervenant dans l'assemblage des murs de maçonnerie. Une étude expérimentale récente (Fouchal *et al*. (2005); Fouchal (2006)) a été dédiée à la caractérisation des différents paramètres mécaniques des constituants de la maçonnerie (brique pleine, brique creuse et mortier) et à la détermination du comportement mécanique en cisaillement des différents prismes de maçonnerie composés de couplets et des triplets en briques pleines et creuses. De ces travaux, nous pouvons tirer les enseignements suivants sur l'ensemble des tests effectués :

- le comportement de la maçonnerie est caractérisé par un comportement non linéaire,
- l'ensemble des prismes testés possède un comportement très rigide sur la partie élastique,
- le comportement des couplets et des triplets composés de briques pleines est caractérisé par un comportement fragile après la valeur limite de rupture,
- le comportement des couplets et de triplets composés de briques creuses est caractérisé par un comportement d'adoucissement suivi par un mouvement de glissement entre les briques adjacentes après la valeur limite de rupture.

On constate de plus une large dispersion des résultats obtenus. Ceci est dû essentiellement aux défauts locaux des composants de la maçonnerie d'une part et de la répartition de mortier après son durcissement, d'autre part. Souvent cette répartition est non uniforme notamment au niveau des "picots" de mortier. Les différents modes de rupture trouvés confirment l'hétérogénéité de la maçonnerie, avec deux types de fissures pouvant se développer :

– soit au niveau de l'interface brique-mortier,
– soit au niveau de l'interface brique-mortier et au niveau du joint de mortier.

Une similitude des résultats (contrainte limite de rupture et déplacements) aussi bien pour les couplets et les triplets en briques pleines que creuses est également mise en évidence.

Cette étude nous a permis d'identifier les phénomènes qui gouvernent la rupture de la maçonnerie à une échelle locale, de caractériser les propriétés mécaniques et bien évidemment dans une certaine mesure la loi de comportement à prendre en compte dans la modélisation des interfaces dans ces structures maçonnées. C'est ce que nous proposons d'aborder dans cet article qui se compose de deux parties principales : nous analysons deux modèles, l'un dû à Raous *et al.* (1997) et l'autre inspiré du modèle d'interphase de Gambarotta *et al.* (1997). Le premier modèle prend en compte l'endommagement et la viscosité de l'interface. Le second modèle est une extension du modèle volumique introduit par Gambarotta *et al.* (1997) qui prend en compte l'endommagement du joint de mortier. Nous introduisons un modèle d'interface quasi-fragile endommageable, appelé par la suite modèle GL-PL, par une technique asymptotique. Les deux modèles ont été validés par rapport à des résultats expérimentaux, présentés tout au long de ce travail.

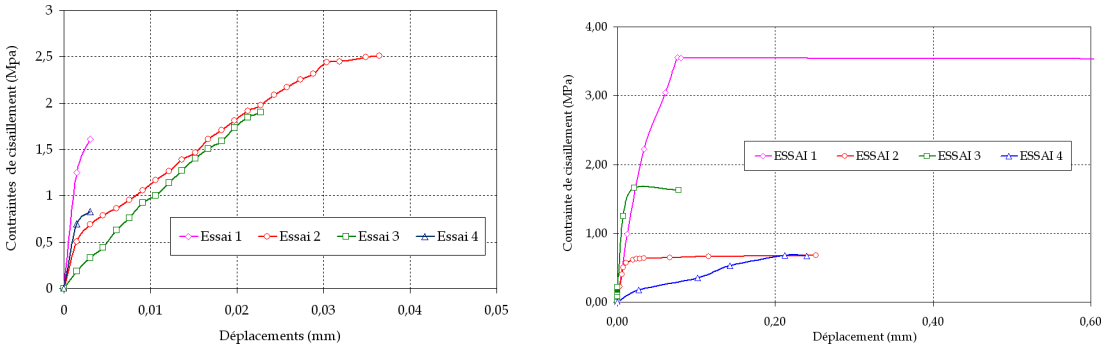

FIG. 1 – Bilan des essais expérimentaux pour des triplets en briques pleines et creuses.

2 Modèle RCCM

Dans cette section, nous allons exposer succinctement le modèle RCCM (Raous *et al.* (1997)) et quelques résultats obtenus sur différents montages, de triplets et de couplets composés de briques pleines et creuses. Nous allons également nous intéresser à l'essai RILEM concernant la compression diagonale d'un mur. Ce modèle d'interface permet de coupler les conditions de contact unilatéral, de frottement et d'adhérence entre deux solides déformables. L'idée fondamentale de ce modèle est d'introduire une variable d'état supplémentaire pour décrire l'état du contact. Cette variable d'intensité d'adhérence, notée β, a été initialement introduite par Fremond (1987). Cette variable mesure la proportion de liaisons actives entre deux corps en contact. Elle est choisie telle que : $\beta = 1$ adhésion totale, $0 < \beta < 1$ adhésion partielle et $\beta = 0$ plus d'adhésion. La loi d'adhésion s'écrit comme suit :

1. Contact unilatéral avec adhésion

$$R_N - C_N[u_N]\beta^2 \geq 0; \quad [u_N] \geq 0, \quad (R_N - C_N[u_N]\beta^2)[u_N] = 0$$

2. Loi de frottement avec adhérence

$$R_T^r = C_T[u_T]\beta^2, R_N^r = R_N$$
$$||R_T - R_T^r|| \leq \mu|R_N - C_N[u_N]\beta^2|$$
$$||R_T - R_T^r|| < \mu|R_N - C_N[u_N]\beta^2| \quad \Rightarrow \quad [\dot{u_T}] = 0$$
$$||R_T - R_T^r|| = \mu|R_N - C_N[u_N]\beta^2| \quad \Rightarrow \quad \exists\lambda \geq 0, \quad [\dot{u_T}] = \lambda(R_T - R_T^r)$$

3. Évolution de l'intensité d'adhérence

$$b\dot{\beta} = -(wh^{`}(\beta) - (C_N[u_T]^2 + C_T|[u_T]|^2)\beta)^- \quad si \quad \beta \in [0, 1[$$
$$b\dot{\beta} \geq -(wh^{`}(\beta) - (C_N[u_T]^2 + C_T|[u_T]|^2)\beta)^- \quad si \quad \beta = 1$$

Cette loi a été implémentée dans le code LMGC90 (Dubois *et al.* (2003)). Nous nous proposons maintenant de présenter quelques exemples numériques.

2.1 Triplets en briques pleines : le cas d'une rupture de l'interface

On s'intéresse aux structures élémentaires présentées dans l'introduction. Un première étape consiste à identifier les paramètres intervenant dans la loi d'adhésion présentée au début de ce paragraphe. On peut voir sur la figure 2, une comparaison entre une mesure expérimentale et un essai numérique dans le cas d'une rupture totale de l'interface pour un triplet en briques pleines. On observe dans ce cas que les résultats sont satisfaisants qualitativement et quantitativement.

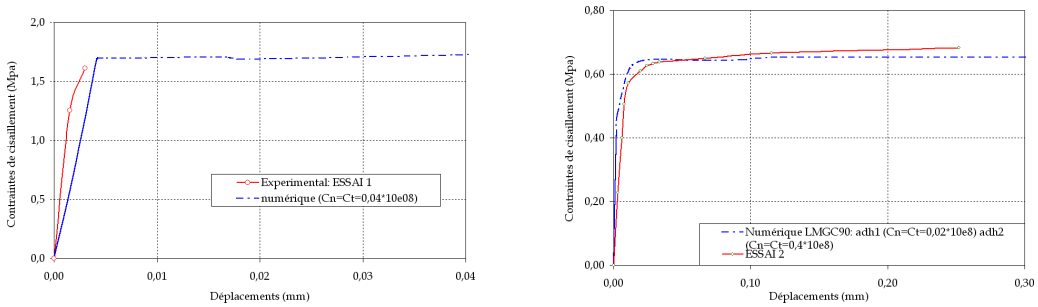

FIG. 2 – Essai de cisaillement sur un triplet en briques pleines et un triplet en briques creuses.

2.2 Triplets en briques creuses

Dans le cas de briques creuses, il est nécessaire de tenir compte des tétons de mortier. On considère donc deux jeux de paramètres différents suivant que l'on ait une interface brique/mortier ou une interface au niveau des tétons. On peut observer sur la figure 2, à droite, que l'on a une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et numériques.

2.3 Triplets en briques pleines : le cas d'un mortier fissuré

Dans le cas où l'on observe expérimentalement une rupture du mortier, il est indispensable d'en tenir compte dans la modélisation. A cet effet, nous avons modélisé le mortier comme un milieu cohésif dont les éléments sont reliés entre eux par une loi d'adhésion de type RCCM avec des paramètres différents. Sur la figure 3, on peut observer une tendance générale correcte des résutats expérimentaux et numériques ainsi que l'apparition de fissures à l'intérieur du mortier. Cependant, on constate un écart relatif entre les courbes et on pourrait, de ce fait, envisager d'améliorer la concordance des résultats.

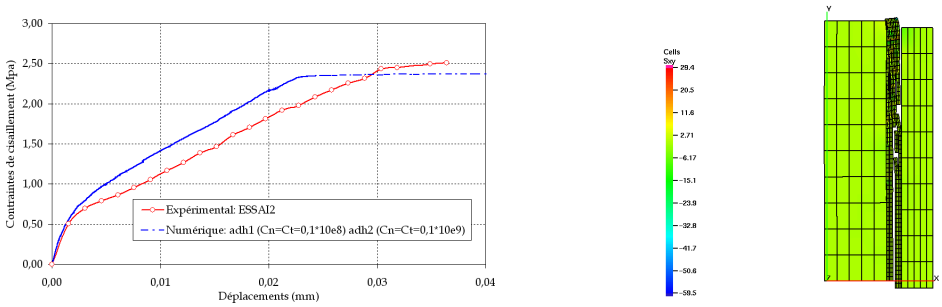

FIG. 3 – Essai de cisaillement sur un triplet en briques pleines : rupture du mortier.

2.4 Essai RILEM

Le dernier exemple que nous présentons est celui de l'essai RILEM de compression diagonale. On peut voir sur la figure 4 que l'on obtient un résultat très correct d'un point de vue qualitatif. Dans ce cas, nous avons considéré un mortier cohésif afin de simuler les éventuelles ruptures de celui-ci.

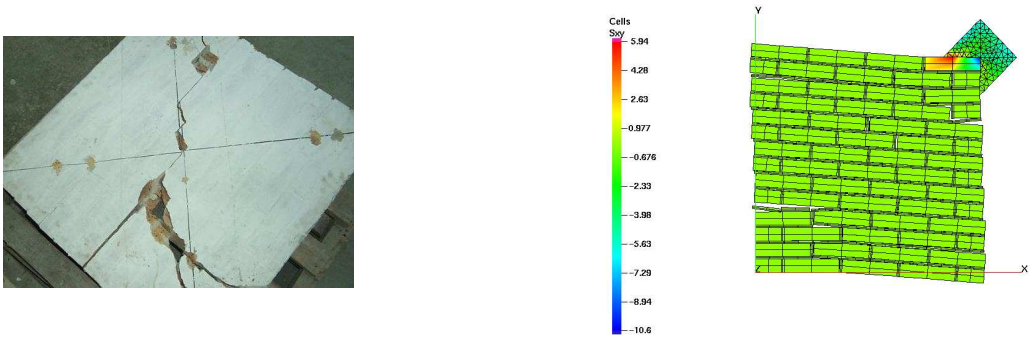

FIG. 4 – Essai de compression diagonale.

En conclusion, on peut observer que le modèle RCCM est apte à modéliser l'interface brique/mortier même si l'on peut espérer l'améliorer. C'est ce que nous tentons de faire dans la partie suivante.

3 Modèle asymptotique GL-PL

Nous nous penchons à présent vers une modélisation asymptotique de l'endommagement occasionné dans les interfaces entre le mortier et la brique. Cette modélisation tient compte de certains phénomènes mécaniques qui gouvernent leur rupture tels que le glissement et le frottement à l'échelle microscopique, ainsi que de l'endommagement (normal et/ou tangentiel). Pour ce faire, nous nous inspirons d'une version simplifiée du modèle d'interphase de Gambarotta *et al*. (1997) pour établir notre modèle d'interface qui aura la particularité d'être quasi-fragile et endommageable. En adoptant une approche asymptotique (Sanchez-Palencia *et al*. (1992)), en faisant tendre l'épaisseur de l'interface vers zéro, nous avons pu passer d'un comportement volumique à un comportement surfacique (cf figure 5). La variable de l'endommagement, notée α, du modèle GL-PL est gouvernée par un seuil de type élasto-plasticité avec écrouissage.

3.1 Ecriture du modèle

• Le comportement volumique

En nous inspirant du modèle d'interphase, nous choisissons d'écrire le comportement volumique de la manière suivante :

$$\varepsilon \;=\; K\,.\,\sigma \;+\; \varepsilon^* \quad \Leftrightarrow \quad \sigma \;=\; L\,.\,(\varepsilon - \varepsilon^*) \quad \text{avec} \quad K^{-1} = L \tag{1}$$

K est le tenseur de compliance. L est le tenseur de rigidité : c'est une matrice diagonale formée par le terme de compliance normal C_N et par le terme de compliance tangentiel C_T. Les deux composantes anélastiques ε^* s'expriment alors matriciellement par :

$$\begin{pmatrix} \epsilon^* \\ \gamma^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h(\alpha)\,H(\sigma_n) & 0 \\ \pm\,k(\alpha)\,\chi_I\,\mu & k(\alpha)\,\chi_I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_n \\ \tau \end{pmatrix} \tag{2}$$

Notons D cette matrice (2×2). χ_I désigne la fonction caractéristique de l'endommagement tangentiel de l'ensemble $I =]-\mu\sigma_n\,,\,+\mu\sigma_n[^c$ avec $f = \pm\mu\,\sigma_n$.

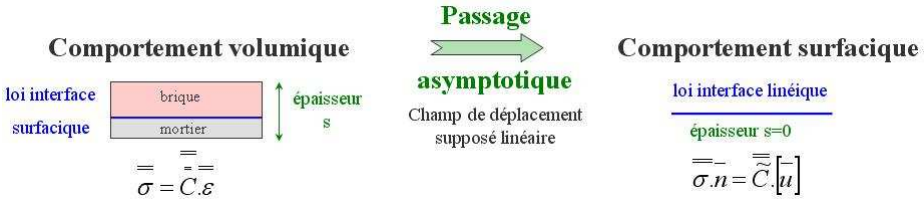

FIG. 5 – Schématisation du modèle asymptotique.

• Le comportement surfacique

Par passage à la limite sur l'épaisseur, on déduit de (1) et (2) les formules suivantes :

$$\sigma\,.\,n \;=\; L\,.\,(\,[\bar{u}] - [\bar{u}^*]\,) \quad \text{et} \quad [\bar{u}^*] \;=\; D\,.\,\sigma\,.\,n \quad \Leftrightarrow \quad \sigma\,.\,n \;=\; \Big(I + L\,.\,D\Big)^{-1}.\,L\,.\,[\bar{u}] \tag{3}$$

$$\text{Soit} \quad \sigma_n \;=\; \frac{C_N}{1 \,+\, C_N\,h(\alpha)\,H(\sigma_n)}\,[u_N] \tag{4}$$

$$\text{et} \quad \tau \;=\; \pm\,\frac{C_N\,C_T\,\mu\,k(\alpha)\,\chi_I \quad [u_N]}{(\,1 \,+\, C_N\,h(\alpha)\,H(\sigma_n)\,)\,(\,1 \,+\, C_T\,k(\alpha)\chi_I\,)} \;+\; \frac{C_T}{1 \,+\, C_T\,k(\alpha)\,\chi_I}\,[u_T] \tag{5}$$

La matrice déduite n'est pas diagonale : un terme de couplage non symétrique (dû au frottement) apparaît entre le terme de compliance normal C_N et le terme de compliance tangentiel C_T.

3.2 Modélisation numérique

Cette modélisation est basée sur la méthode des éléments finis, avec le choix des éléments quadrangles. Finalement, après assemblage, nous devons résoudre le système linéaire (6) où K est la matrice de rigidité et V la matrice associée à l'interface.

$$K\,\delta u \;-\, V\,\delta[u] \;=\; F \tag{6}$$

On condense les équations sur le bord de contact et on obtient le système suivant :

$$A_{cc}\,u_c \;+\; \tilde{A}_{cc}\,[u_c] \;=\; \tilde{F}_c \quad \text{avec} \;\; u_i = \{u_{Ni}\,,\,u_{Ti}\}^t \tag{7}$$

A_{cc} est la matrice condensée volumique alors que $\tilde{A}_{cc}$, de même taille que A_{cc}, est la matrice non symétrique prenant en compte l'endommagement de l'interface. Deux algorithmes incrémentaux, l'un explicite et l'autre implicite (Pelissou *et al.* (2007)), ont été implantés dans le code éléments finis Gyptis pour résoudre numériquement le modèle GL-PL.

3.3 Validation numérique : Test de cisaillement pur

Considérons quatre briques pleines connectées par des joints de mortier soumises à du cisaillement pur sur l'une des parois de la première brique (cf figure 6.a). Nous suivons l'évolution de l'endommagement de chacune des briques au cours du temps (figure 6.c) : on constate que cet endommagement augmente au cours du temps en se propageant de brique en brique, après avoir dépassé le seuil de frottement ($|\tau| < \pm\,\mu\,|\sigma_n|$).

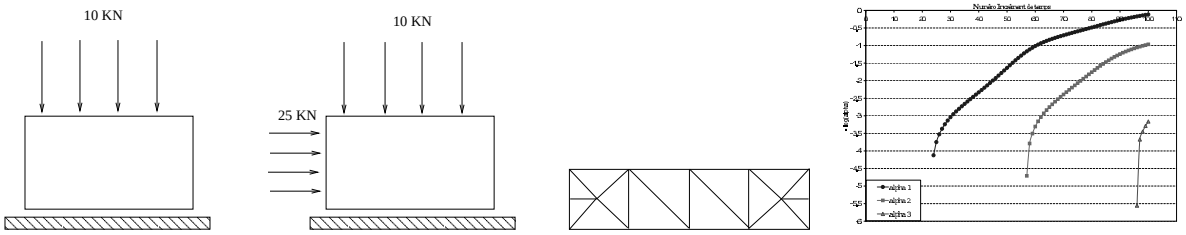

FIG. 6 – a) Test de cisaillement pur en deux étapes, b) Maillage de l'assemblage des 4 briques pleines, c) Evolution de l'endommagement au cours du temps des 3 premières briques avec une échelle logarithme.

4 Conclusions

Nous avons introduit deux modélisations pour étudier le comportement mécanique des interfaces des murs de maçonnerie, l'une prenant en compte l'adhérence entre deux solides et l'autre l'endommagement au niveau de l'interface. Des essais expérimentaux et des résultats numériques viennent appuyer ces deux modélisations.
Le premier modèle a montré que l'on pouvait rendre compte de façon assez précise du comportement de structures maçonnées même relativement complexes. Le second modèle a montré son efficacité sur des exemples académiques. Une comparaison entre le premier modèle et avec les résultats expérimentaux est en cours.

Références

Dubois, F., Jean, M. 2003 LMGC90 une plateforme de développement dédiée à la modélisation de problèmes d'intéraction. *6ème Colloque National en Calcul des Structures*, Giens, 18-21 Mai 2003, 111-118.

Fouchal, F., Titeux, I., Lebon, F. 2005 Contribution à la modélisation des interfaces dans des structures maçonnées. *17ème Congrès Français de Mécanique*, Troyes, Sept 2005.

Fouchal, F. 2006 Contribution à la modélisation numérique des interfaces dans les structures maçonnées. *Thèse de doctorat*, Université de Reims Champagne Ardenne, Dec 2006.

Frémond, M. 1987 Adhérence des solides. *J. de Mécanique Théorique et Appliquée 6*, 383-407.

Gambarotta, G.I, Lagomarsino, S. 1997 Damage models for the seismic response of brick masonry walls. Part I : The continuum model and its application. *Eartquake Eng.Struct.Dyn.* **26** 441-462.

Pelissou, C., Lebon, F. 2007 Modélisation asymptotique de l'endommagement dans les interfaces quasi-fragiles. *8ème Colloque National en Calcul des Structures*, Giens, 21-25 Mai 2007, à paraître.

Raous, M., Cangémi, L., Cocu, M. 1999 A consistent model coupling adhesion friction and unilateral contact. *Comput. Meth. Appl. Mechanics and Eng.* **177** (3-4) 383-399.

Sanchez-Palencia, E., Sanchez-Hubert, J. 1992 Introduction aux méthodes asymptotiques et à l'homogénéisation. *Editions Masson, Paris*.