

Printed from

Journal of Scientific Research

<http://www2.univ-bechar.dz/jrs/>

Modélisation des interfaces dans les structures maçonnées par une loi de contact

Mekki Oum Kalthoum, Terfaya Nazihe, Berga Abdelmadjid
Laboratoire de Fiabilité des Matériaux et des Structures (FIMAS)
Université de Béchar ALGERIE
Corresponding author: mekki-oumkalthoum@hotmail.com

Published on 10 December 2011

The Editor, on behalf of the Editorial Board and Reviewers, has great pleasure in presenting this number of the Journal of Scientific Research. This journal (ISSN 2170-1237) is a periodic and multidisciplinary journal, published by the University of Bechar. This journal is located at the interface of research journals, and the vulgarization journals in the field of scientific research. It publishes quality articles in the domain of basic and applied sciences, technologies and humanities sciences, where the main objective is to coordinate and disseminate scientific and technical information relating to various disciplines.

The research articles and the development must be original and contribute innovative, helping in the development of new and advanced technologies, like the studies that have concrete ideas which are of primary interest in mastering a contemporary scientific concepts. These articles can be written in Arabic, French or English. They will not be published in another journal or under review elsewhere. The target readership is composed especially of engineers and technicians, teachers, researchers, scholars, consultants, companies, university lab, teaching techniques and literary ... The journal is obtainable in electronic form, which is available worldwide on the Internet and can be accessed at the journal URL:

<http://www2.univ-bechar.dz/jrs/>.

Director of Journal
Pr. BELGHACHI Abderrahmane

Editor in Chief
Dr. HASNI Abdelhafid

Editorial Member

Mr. TERFAYA Nazihe
Mr. BOUIDA Ahmed
Mr. LATFAOUI Mohieddine
Mr. OUAHABI Abdelhakim

Reviewers board of the Journal.

Pr. KADRY SEIFEDINE (The American University in KUWAIT)
Pr. RAZZAQ GHUMMAN Abdul (Al Qassim University KSA)
Pr. PK. MD. MOTIUR RAHMAN (University of Dhaka Bangladesh)
Pr. MAHMOOD GHAAZAW Yousry (Al Qassim University KSA)
Pr. KHENOUS Houari Boumediene (King Khalid University KSA)
Pr. RAOUS Michel (Laboratory of Mechanic and Acoustic France)
Pr. RATAN Y. Borse (M S G College Malegaon Camp India)
Pr. LEBON Frédéric (University of Aix-Marseille 1 France)
Pr. MONGI Ben Ouédou (National Engineering School of Tunis)
Pr. BOUKELIF Aoued (University of Sidi Bel Abbes Algeria)
Pr. DJORDJEVICH Alexandar (University of Hong Kong)
Pr. BENABBASSI Abdelhakem (University of Bechar Algeria)
Pr. BOULARD Thierry (National Institute of Agronomic Research France)
Pr. LUCA Varani (University of Montpellier France)
Dr. FELLAH Zine El Abidine Laboratory of Mechanic and Acoustic France)
Dr. ZHEN Gao (University of Ontario Institute of Technology Canada)
Dr. OUERDACHI Lahbassi (University of Annaba Algeria)
Dr. HADJ ABDELKADER Hicham (IBISC – University of Evry France)
Dr. KARRAY M'HAMED ALI (National Engineering School of Tunis)
Dr. ALLAL Mohammed Amine (University of Tlemcen Algeria)
Dr. FOUCAL Fazia (GEMH - University of Limoges France)
Dr. TORRES Jeremi (University of Montpellier 2 France)
Dr. CHANDRAKANT Govindrao Dighavka (L. V. H. College of Panchavati India)
Dr. ABID Chérifa (Polytech' University of Aix-Marseille France)
Dr. HAMMADI Fodil (University of Bechar Algeria)
Dr. LABBACI Boudjemaa (University of Bechar Algeria)
Dr. DJERMANE Mohammed (University of Bechar Algeria)
Dr. BENSALI Abd-El-Hamid (University of Tlemcen)
Dr. BENBACHIR Maamar (University of Bechar Algeria)

Pr. BALBINOT Alexandre (Federal University of Rio Grande do Sul Brazil)
Pr. TEHIRICHI Mohamed (University of Bechar Algeria)
Pr. JAIN GOTAN (Materials Research Lab., A.C.S. College, Nandgaon India)
Pr. SAIDANE Abdelkader (ENSET Oran Algeria)
Pr. DI GIAMBERARDINO Paolo (University of Rome « La Sapienza » Italy)
Pr. SENGOUA Nouredine (University of Biskra Algeria)
Pr. CHERITI Abdelkarim (University of Bechar Algeria)
Pr. MEDALE Marc (University of Aix-Marseille France)
Pr. HELMAOUI Abderrachid (University of Bechar Algeria)
Pr. HAMOUIE Abdelmadjid (University of Bechar Algeria)
Pr. DRAOUI Belkacem (University of Bechar Algeria)
Pr. BELGHACHI Abderrahmane (University of Bechar Algeria)
Pr. SHAILENDHRA Karthikeyan (AMRITA School of Engineering India)
Pr. BURAK Barutcu (University of Istanbul Turkey)
Dr. SELLAM Mebrouk (University of Bechar Algeria)
Dr. ABDUL RAHIM Ruzairi (University Technology of Malaysia)
Dr. BELBOUKHARI Nasser (University of Bechar Algeria)
Dr. CHIKR EL MEZOUAR Zouaoui (University of Bechar Algeria)
Dr. BENACHAIBA Chellali (University of Bechar Algeria)
Dr. KAMECHE Mohamed (Centre des Techniques Spatiales, Oran Algeria)
Dr. MERAD Lotfi (Ecole Préparatoire en Sciences et Techniques Tlemcen Algeria)
Dr. BASSOU Abdesselam (University of Bechar Algeria)
Dr. ABOU-BEKR Nabil (Universit of Tlemcen Algeria)
Dr. BOUNOUA Abdennacer (University of Sidi bel abbes Algeria)
Dr. TAMALI Mohamed (University of Bechar Algeria)
Dr. FAZALUL RAHIMAN Mohd Hafiz (University of Malaysia)
Dr. ABDELAZIZ Yazid (University of Bechar Algeria)
Dr. BERGA Abdelmadjid (University of Bechar Algeria)
Dr. Rachid KHALFAOUI (University of Bechar Algeria)
Dr. SANJAY KHER Sanjay (Raja Ramanna Centre for Advanced Technology INDIA)

Journal of Scientific Research

P.O.Box 417 route de Kenadsa
08000 Bechar - ALGERIA
Tel: +213 (0) 49 81 90 24
Fax: +213 (0) 49 81 52 44

Editorial mail: jrs.bechar@gmail.com
Submission mail: submission.bechar@gmail.com
Web: <http://www2.univ-bechar.dz/jrs/>



Modélisation des interfaces dans les structures maçonnées par une loi de contact

Mekki Oum Kalthoum¹, Terfaya Nazihe², Berga Abdelmadjid³

Laboratoire de Fiabilité des Matériaux et des Structures (FIMAS)

Université de Béchar ALGERIE

¹ mekki-oumkalthoum@hotmail.com, ² t_nazihe@yahoo.fr, ³ bergaabdelmadjid@gmail.com

RÉSUMÉ. La compréhension et la simulation des ouvrages en maçonnerie sont aujourd'hui indispensables à la préservation du patrimoine au sens large – restauration de monuments historiques, rénovation de bâtiments...etc., où un intérêt accru est porté à l'étude des ouvrages maçonnés et à leurs modélisations sous différentes sollicitations extérieures. Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à la modélisation de comportement des interfaces et de phénomène de contact dans les structures maçonnées par une loi d'interface couplant contact, frottement et adhérence (modèle RCCM) développé par le groupe de Michel RAOUS au LMA (Marseille). L'étude est limitée à des cas réduits. La confrontation des résultats numériques avec les résultats expérimentaux a été très encourageante dans la plupart des cas, et a montré qu'un bon choix de modèle d'interface est suffisant pour bien présenter le comportement des structures maçonnées.

Abstract. The comprehension and simulation of structures in masonry are now essential to the preservation of heritage in the broadest sense - restoration of historic buildings, renovation of buildings etc., where an increased interest is brought to the study of masonry structures and their modeling under different external stresses. As part of this work, we are interested in modeling the behavior of interfaces and contact phenomenon in masonry structures by an act of interface coupling contact, friction and adhesion (RCCM model) developed by the group of Michel Raous in LMA (Marseille). The study is limited to reduced cases. The comparison of numerical results with experimental results has been very encouraging in most cases and showed that a good choice of interface model is sufficient to properly present the behavior of masonry structures.

MOTS-CLÉS : Maçonnerie, Interface, Contact et frottement, adhérence.

I. Introduction

La préservation du patrimoine national à travers la restauration des monuments historiques et la rénovation des bâtiments anciens nécessite des travaux de recherche sur le comportement des structures en maçonnerie. Le travail de recherche entamé s'inscrit dans le cadre d'intérêt national, et se propose d'étudier le comportement d'une structure maçonnée en prenant en considération les principaux phénomènes mécaniques qui gouvernent leur rupture tels que contact, frottement et adhérence.

II. Lois de contact et frottement classique

Considérons deux corps A et B en contact (figure 1). La projection orthogonale d'un point P de A sur la surface de B définit un point P' qui sera l'origine du repère local $(\vec{t}_1; \vec{t}_2; \vec{n})$. Soient v la vitesse relative en P de A par rapport à B, et r la réaction que subit A de la part de B [1].

Les lois de contact et de frottement s'expriment dans le repère local par des relations entre v , r et la plus courte distance entre A et B : $x_n = \overline{PP'}$.

III. Modèle RCCM

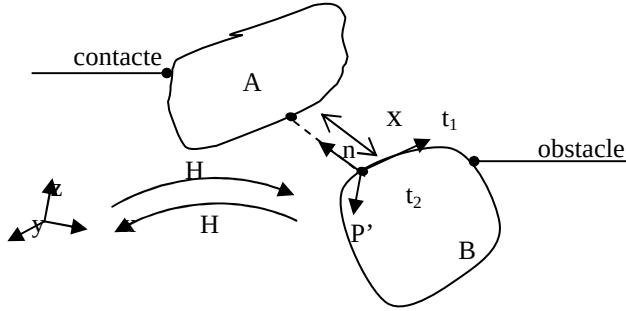


Figure 1. Repère local de contact

II.1. Critère de contact unilatéral:

Les points appartenant à la zone de contact doivent satisfaire les lois régissant le contact unilatéral. Elles sont connues généralement sous le nom de : condition de Signorini et s'expriment par les conditions suivantes:

- Impénétrabilité : $x_n \geq 0$
- Etat de contact statique (non-adhésion):
 $x_n = 0 \Rightarrow r_n \geq 0$
- Etat de non contact : $x_n > 0 \Rightarrow r_n = 0$

Ces trois conditions peuvent être condensées sous la forme équivalente [2]:

$$\forall \rho > 0 \quad r_n = \text{proj}_{R^+}(r_n - \rho x_n) \quad (1)$$

II.2. Critère de frottement:

Il existe beaucoup de choix, nous avons choisi le modèle de Coulomb, qui est le plus utilisé dans le cas de contact à sec. Le modèle s'exprime par les relations:

$$\begin{cases} \|r_t\| \leq \mu r_n & \text{si } u_t = 0 \\ r_t = -\mu r_n u_t / \|u_t\| & \text{si } \|u_t\| \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Où μ désigne le coefficient de frottement et u_t la composante tangentielle du déplacement relatif (le glissement). Dans le calcul numérique on utilise la forme équivalente suivante [2]:

$$\forall \rho > 0, \quad r_t = \text{proj}_C(r_t - \rho u_t) \quad (3)$$

Où C est le cône de Coulomb limité par l'intervalle

$$[-\mu r_n, \mu r_n].$$

Le modèle RCC (Raous-Cangémi-Cocou) a été présenté pour la première fois dans Raous et al. 1997 [3], Cangémi 1997 [4] et détaillé dans Raous et al. 1999 [5]. Il a été développé sous sa forme actuelle, avec la prise en compte du frottement variable à l'aide du terme $(1-\beta)$ dans Monerie, 2000 [6] et Raous et Monerie, 2002[7] : le modèle RCCM. Dans ce modèle, l'adhésion est caractérisée par une variable interne β , introduite par Frémond (1987, 1988) [8, 9], variable qui mesure l'intensité d'adhésion. L'introduction d'une rigidité de l'interface assure une bonne continuité entre les deux modèles, entre le frottement et l'adhésion. Le comportement de l'interface est décrit par les relations suivantes, où [4] donne le contact unilatéral avec adhésion, [5] donne le frottement de coulomb avec adhésion et [6] donne l'évolution de l'intensité d'adhésion β . Initialement, quand l'adhésion est complète (total), l'interface est élastique tant que le seuil énergétique w n'est pas atteint. Une fois le seuil dépassé, l'endommagement de l'interface commence et par conséquent, d'une part, l'intensité d'adhésion β et la rigidité apparente $\beta^2 C_N$ et $\beta^2 C_T$ diminuent et d'autre part, le frottement apparaît. Quand l'adhésion est totalement rompue ($\beta=0$), on obtient le problème classique de Signorini avec frottement de Coulomb.

a) Contact unilatéral avec adhérence :

$$\begin{aligned} r_n - C_n u_n \beta^2 &\geq 0; \quad u_n \leq 0; \\ (r_n - C_n u_n \beta^2).u_n &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

b) Loi de frottement avec adhérence :

$$\begin{cases} r_t^r = C_t u_t \beta^2; \quad r_n^r = r_n \\ \|r_t - r_t^r\| \leq \mu(1-\beta) |r_n - C_n u_n \beta^2| \\ \|r_t - r_t^r\| < \mu(1-\beta) |r_n - C_n u_n \beta^2| \Rightarrow \dot{u}_t = 0 \\ \|r_t - r_t^r\| = \mu(1-\beta) |r_n - C_n u_n \beta^2| \Rightarrow \exists \lambda \geq 0, \dot{u}_t = \lambda(r_t - r_t^r) \end{cases} \quad (5)$$

c) Evolution de l'intensité d'adhérence :

$$\begin{cases} b\dot{\beta} = -(Wh'(\beta) - (C_n u_n^2 + C_t u_t^2) \beta)^- & \text{si } \beta \in [0,1] \\ b\dot{\beta} \leq -(Wh'(\beta) - (C_n u_n^2 + C_t u_t^2) \beta)^- & \text{si } \beta = 1 \end{cases} \quad (6)$$

Les paramètres constitutifs du modèle sont :

- u_N, u_T : les composantes normale et tangentielle du déplacement relatif [u]
- r_N, r_T : les composantes normale et tangentielle de la densité de force de contact
- r_N^r, r_T^r : les parties réversibles des composantes normale et tangentielle de la densité de force de contact.
- C_N et C_T les raideurs initiales (Pa/m) de l'interface,
- w : le seuil d'énergie de décohésion (j/m²) ;
- μ : le coefficient de frottement ;
- b : la viscosité (J.s/m²) associée à l'évolution de l'adhésion.

IV. Exemples traités

Dans ce présent travail, on va présenter les simulations numériques effectuées sur différents assemblages, en couplets composés de briques pleines et creuses liées entre eux par un mortier d'épaisseur 10mm, et qu'ils ont été déjà étudiés expérimentalement par Fazia Fouchal. Les simulations ont été réalisées sous le code GYPTIS développé au LMA (Marseille) par le groupe de Michel Raous. GYPTIS est un code de calcul qui intègre la loi d'interface développée par Raous et al. [3],[5],[7]. Il est rédigé entièrement en Fortran 90, utilisant des triangles P1 à 3 nœuds, sur la base du code d'éléments finis Modulef. Le code GYPTIS résout en statique ou quasi-statique un problème de déformation plane, contrainte plane ou à symétrie de révolution et permet la communication avec différents module de la plateforme Modulef. Le problème de contact et de frottement est traité par des méthodes de résolution de type projection, ou des méthodes de programmation mathématiques de type Lemke.

IV.1. Essais expérimentaux sur les couplets.

Des essais expérimentaux sont effectués sur des prismes de maçonnerie composés de deux briques (pleine et creuse) connectées par des joints du mortier.

Les échantillons sont disposés dans la machine d'essai et soumis à un chargement monotone croissant uniformément réparti jusqu'à la rupture. Les capteurs extensométrique LVDT placés sur la brique nous permettent de prélever le déplacement relatif entre les deux briques (Fig. 2 et 3). La machine d'essai et le capteur sont connectés à une chaîne d'acquisition (PC) qui enregistre les informations qui sont produites au cours de l'essai. Ces informations sont les déformations longitudinales et le chargement appliqué.

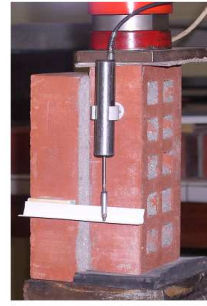


Figure 2. Essai de cisaillement sur des couplets en briques creuses [10]



Figure 3. Essai de cisaillement sur des couplets en briques pleine [10]

Les différents modes de ruptures obtenus pour les couplets testés, composés de briques creuses ou pleines sont montrés au figure 4. Deux catégories de fissurations existent, selon le mode de rupture observé sur l'ensemble des essais :

- Soit la fissure se produit au niveau de l'interface et se développe jusqu'à ce qu'elle traverse le joint de mortier ;
- Soit la fissure se produit et reste localisée au niveau de l'interface, c'est ce que nous allons aborder dans cette partie.



Figure 4. Rupture due à l'essai de cisaillement sur le couplet [10,11]

IV.2. Simulations numériques sur les couplets

Pour simuler l'essai de cisaillement présenté ci-dessus sur l'assemblage de couplet en brique pleine et creuse, on a proposé le modèle indiqué au figure (fig.5).

L'essai consiste à appliquer successivement :

- Un déplacement de confinement U_0 dans la direction perpendiculaire au joint de mortier.
- Un déplacement V_0 imposé sur le bord supérieur de la deuxième brique.

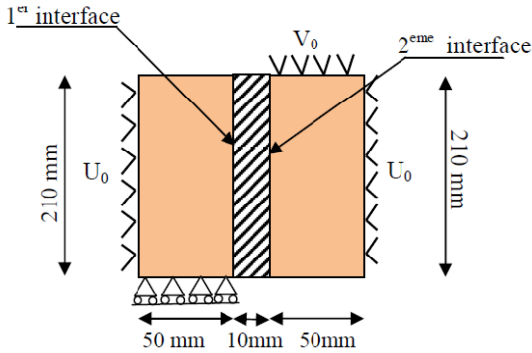


Figure 5. Schématisation de l'essai de cisaillement sur le couplet de brique.

On a utilisé un maillage en élément triangulaire en déformation plane avec 31 nœuds sur l'interface (fig.6)

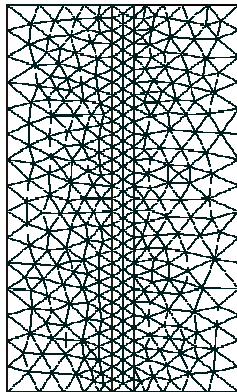


Figure 6. Maillage de couplet composé de brique creuse.

Sur le tableau 01, on a reporté les caractéristiques mécaniques que nous avons utilisées pour la modélisation des différents constituants de la maçonnerie à savoir la brique et le mortier.

Tableau 1. Propriétés mécaniques élastiques utilisées pour la modélisation d'après FAZIA FOUCHAL [10].

Matériaux	Module d'élasticité (Mpa)	Coefficient de poisson
Brique pleine	9438.5	0.13
Brique creuse	6058.8	0.13
Mortier	4000.0	0.3

➤ Cas de brique creuse

L'identification nous a permis de choisir les paramètres de loi d'adhésion RCCM qui sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 2. Paramètres de loi d'adhésion RCCM utilisés dans le cas de couplet en brique creuse.

μ	b (Ns/mm)	w (J/m ²)	C_N (N/mm ³)	C_T (N/mm ³)
0.1	0	10^{-2}	0.01×10^{-3}	0.01×10^{-3}

On a tracé l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction des déplacements relatifs sur l'interface brique-mortier (fig. 7).

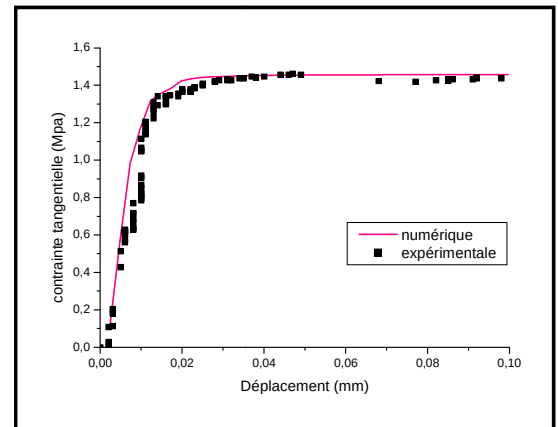


Figure 7. Essai de cisaillement sur un couplet en brique creuse.

On a reporté sur la figure suivante les courbes contraintes tangentielles de l'interface en fonction de déplacement tangentiel de la brique. Pour le cas de couplet en brique creuse, on peut remarquer une partie élastique très importante et un déplacement très faible ce qui signifie que l'interface est très rigide une fois en atteint le seuil de décohésion l'interface se casse et le comportement devient fragile et les 02 briques glissent l'une par rapport à l'autre.

Les figures 8 et 9 montre la déformée ainsi que la répartition des contraintes de cisaillement σ_{xy}

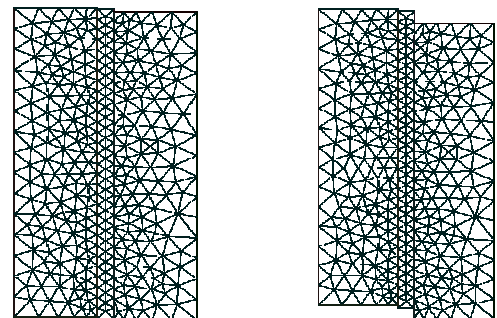
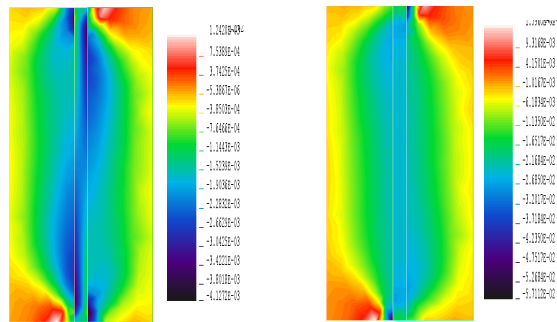


Figure 8. Evolution de la déformée dans le cas de couplet en brique creuse.

Figure 9. Evolution de la contrainte de cisaillement σ_{xy}

Sur les diagrammes de contraintes, on peut constater aisément que quand les forces adhésives s'ajoutent aux réactions de contact, de fortes concentrations apparaissent sur l'interface et surtout aux zones susceptibles d'être endommagé. Une fois la liaison est rompue, seules les réactions de frottement réagissent et on aura moins de concentrations.

➤ Cas de brique pleine

Les paramètres de loi d'adhésion RCCM résultants de l'identification sont reportés sur le tableau suivant :

Tableau 3. Paramètres de loi d'adhésion RCCM utilisés dans le cas de couplet en brique pleine.

μ	b (Ns/mm)	w (J/m ²)	C_N (N/mm ³)	C_T (N/mm ³)
0.1	0	10^{-2}	0.05×10^3	0.05×10^3

Le bilan de la simulation dressé est montré sur la figure 10, où on a présenté les réponses au cisaillement des essais, expérimental et numérique pour le couplet en brique pleine.

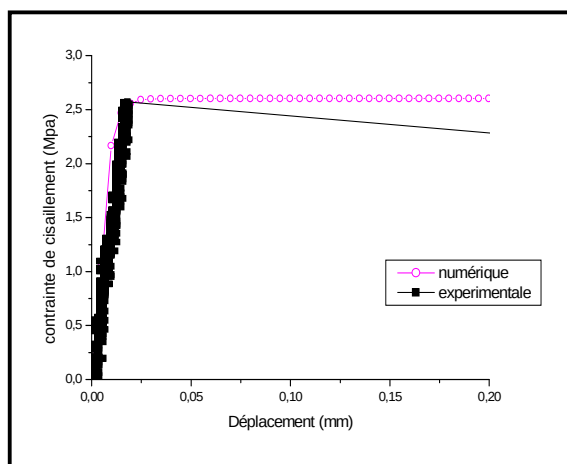


Figure 10. Essai de cisaillement sur un couplet en brique pleine.

Les premières constatations montrent une très bonne concordance entre les deux réponses. La rupture de l'interface se déclenche pour un saut de glissement faible entre les nœuds de l'interface brique-mortier, ce qui donne l'idée d'un comportement rigide de l'interface dans la phase élastique. Une fois on dépasse le seuil de décohésion, le glissement devient plus important et, on passe à un comportement plus fragile.

Sur les figures 11 et 12, on montre les modes de rupture de la structure au début de chargement et à la fin de chargement, ainsi que la distribution des contraintes de cisaillement le long des deux interfaces.

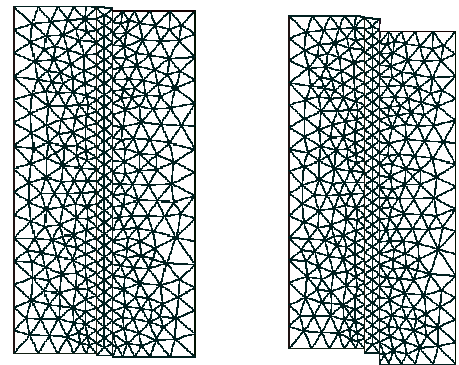
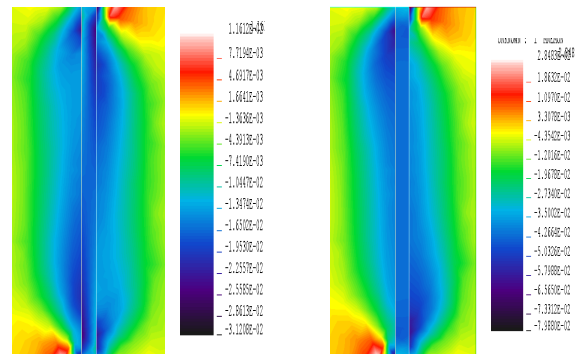


Figure 11. Evolution de la déformée dans le cas de couplet en brique pleine.

Figure 12. Evolution de la contrainte de cisaillement σ_{xy}

La distribution des contraintes montre l'influence d'une force adhésive sur le comportement.

V. Conclusion

Pour conclure, dans ce travail nous avons abordé la modélisation des interfaces dans les structures maçonnées. Notre contribution a consisté à mettre en œuvre un outil de modélisation et de prédiction numériques. Notre choix s'est porté sur le modèle RCCM que nous avons utilisé dans une version simplifiée avec viscosité nulle.

La comparaison du modèle avec les expérimentations sur modèles réduits, montre une très bonne concordance. En faite, la confrontation des résultats numériques avec les résultats expérimentaux que nous avons effectués avec le logiciel GYPTIS à été dans la plupart des cas très encourageantes, et a montré qu'un bon choix de modèle d'interface est suffisant pour bien présenter le comportement des structures maçonnées.

Références

- [1] FENG, Z. Q. (1991): *Contribution à la modélisation des problèmes non linéaires : contact, plasticité et endommagement*, Thèse de doctorat, UTC, France.
- [2] FENG, Z. Q., TOUZOT G., (1992) : *Analyses bi et tridimensionnelles des problèmes de contact avec frottement par une méthode mixte*. Revue Européenne, Vol. 1, no 4, pp. 441-459.
- [3] RAOUS M., CANGEMI L., COCU M. (1997): *Un modèle couplant adhérence et frottement pour le contact unilatéral entre deux solides déformables*. C.R. Acad. Sci. paris. Mécanique de solide et des structures, pp.503-509.
- [4] CANGEMI L.(1997) :*Frottement et adhérence : modèle, traitement numérique et application à l'interface fibre/matrice*. Thèse de doctorat, laboratoire de Mécanique et d'acoustique de Marseille.
- [5] RAOUS M., CANGEMI L., COCOU M. (1999) :*Consistent model coupling adhesion, friction and unilateral contact*. Computer Meth. Appl. Mech. And Engrg, 177(3-4): 383.399.
- [6] MONERIE Y.(2000):*Fissuration des matériaux composites : rôle de l'interface fibre/matrice*. Thèse, Ecole Supérieure de Mécanique de Marseille.
- [7] RAOUS M., MONERIE Y. (2002): *Unilateral contact, friction and adhesion: 3D cracks in composite materials*. In Martins, J.A.C. and Monteiro Marques M.D.P., eds, contact mechanics, Kluwer, pp.333-346.
- [8] FRÉMOND M. (1987) : *Adhérence des solides*. Journal de Mécanique Théorique et Appliquée, pp. 383-407
- [9] Frémond M. (1988): *Contact with adhesion*. In Moreau, J.-J. and Panagiotopoulos, P.D., editors, Non smooth mechanics and applications, CISM courses and lectures, Number 302, Springer, 177-221.
- [10] FAZIA FOUCHAL(2006) : *Contribution à la modélisation numérique des interfaces dans les structures maçonnées*. Thèse, Université de Reims Champagne-Ardenne.
- [11] FAZIA FOUCHAL, FREDERIC LEBON, ISABELLE TITEUX (2009): *Contribution to the modeling of interfaces in masonry construction*. Journal construction and Building Materials, 23 (2009) 2428–2441.

Journal of Scientific Research

**P.O.Box 417 route de Kenadsa
08000 Bechar - ALGERIA
Tel: +213 (0) 49 81 90 24
Fax: +213 (0) 49 81 52 44
Editorial mail: jrs.bechar@gmail.com
Submission mail: submission.bechar@gmail.com
Web: <http://www2.univ-bechar.dz/jrs/>**
