



HAL
open science

Contribution à la modélisation des interfaces dans les structures maçonnées

Fazia Fouchal, Isabelle Titeux, Frédéric Lebon

► **To cite this version:**

Fazia Fouchal, Isabelle Titeux, Frédéric Lebon. Contribution à la modélisation des interfaces dans les structures maçonnées. 17e Congrès Français de Mécanique, Aug 2005, Troyes, France. hal-00108991

HAL Id: hal-00108991

<https://hal.science/hal-00108991>

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Contribution à la modélisation des interfaces dans des structures maçonneries

Fazia FOUCHAL^a, Isabelle TITEUX^a, Frédéric LEBON^b

^a Université de Reims Champagne Ardenne
Groupe de Mécanique, Matériaux et Structures EA2617
Moulin de la Housse, BP1039, 51687 Reims Cedex 2

^b Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique
Université de Provence, Marseille

Résumé :

L'objectif de notre étude consiste à modéliser les interfaces dans les structures maçonneries en prenant en considération les principaux phénomènes mécaniques qui gouvernent leur rupture tels que l'adhérence, le glissement, le frottement, l'endommagement, etc. Pour cela il est nécessaire de déterminer expérimentalement les lois de comportement et les valeurs précises des caractéristiques mécaniques de la maçonnerie qui seront à prendre en compte dans les modèles.

Les maçonneries sont des matériaux composites qui présentent des propriétés différentes selon les directions, à cause des joints de mortiers qui se comportent comme des plans de faiblesse. Plusieurs facteurs peuvent expliquer la difficulté pour modéliser une maçonnerie : son anisotropie, les dimensions des blocs (pierres ou briques), l'épaisseur des joints, les propriétés intrinsèques des blocs et du mortier, la disposition des joints d'assise et des joints verticaux ainsi que la mise en oeuvre (le « coup de main » de l'homme). Par conséquent, la maçonnerie constitue généralement un assemblage anisotrope et inélastique caractérisé par une résistance à la traction souvent faible. Afin de mieux comprendre le comportement mécanique des interfaces et de définir leurs caractéristiques mécaniques, nous avons effectué des essais expérimentaux sur différents prismes de maçonnerie composés de deux et de trois briques (pleines et creuses) connectées par des joints du mortier.

Abstract

The aim of our study consists to model the interfaces in masonry structures taking into account the main mechanical phenomena which control their rupture such as adherence, slip, friction, the damage, etc.

It is necessary to determine experimentally the behaviour laws and the numerical values of the mechanical characteristics of masonry to be taken into account in our model.

Masonries are materials which have various properties according to directions because to the joints of mortars which behave like plans of weakness. Several factors can explain the difficulty in modelling a masonry: the anisotropy, the dimensions of the blocks (stones or bricks), the thickness of the joints, the intrinsic properties of the blocks and the mortar, the relative position of the horizontal joints and the vertical joints as well as the setting (made by hand). Consequently, usually masonry constitutes an anisotropic and inelastic assembly characterized by a tensile and often low strength. In order to better understand the mechanical behaviour of the interfaces and to define their mechanical characteristics, we carried out some experimental tests on various prisms of masonry made up of two and three bricks (full and dig) connected by joints of the mortar.

I- Introduction

De nombreux chercheurs se sont intéressés et s'intéressent encore à l'étude des comportements des structures maçonnées ; c'est le cas notamment de chercheurs italiens à cause de leur intérêt culturel, social et économique pour la restauration et la sauvegarde de leur patrimoine architectural. Ces recherches ont permis d'établir des modèles théoriques et numériques basés sur diverses approches mais qui font intervenir dans la plupart des cas les techniques d'homogénéisation. Des difficultés apparaissent en appliquant ces techniques telles que la caractérisation des comportements des différents constituants, et surtout la prise en compte de tous les phénomènes anélastiques qui se développent au sein des structures (endommagement, rupture, fissuration,...). Les non linéarités dans ce type de structures sont dues en particulier à l'interface entre la brique et le mortier d'où l'intérêt et l'objectif de notre contribution.

Le comportement mécanique de ces structures dépend fortement de la nature des constituants de la maçonnerie, composée de blocs à base de matériaux naturels ou artificiels, connectés par des joints de mortier. Ce dernier est caractérisé par une faible épaisseur. Par conséquent, le matériau composite est affecté par la réponse de l'assemblage qui peut reproduire de nombreux modes de rupture cinématiques sur le joint tels que : le glissement, l'ouverture, la fermeture des fissures et leur dilatation. Afin de mieux comprendre ces phénomènes cinématiques et expliquer leur influence sur le comportement mécanique de l'ensemble de la maçonnerie, divers essais expérimentaux sont effectués sur le joint uniquement, soumis soit à une traction pure, compression ou bien au cisaillement. Les expériences ont montré que les régimes pré et post-pic sont fonction des propriétés élastiques. L'étude du régime post-pic est effectuée pour caractériser les propriétés quasi-fragiles du matériau (la perte de cohésion, l'évolution du développement des fissures, la dilatation du matériau, la perte de stabilité, l'apparition de déformations résiduelles).

La plupart des études sur la micro modélisation concentrent leurs efforts sur la formulation des lois d'interface. Sur cette thématique de nombreux modèles sont proposés dans la littérature. La première tentative est celle de *Page (1978)* qui a supposé que la brique avait un comportement élastique et le joint possédait une réponse non-linéaire se comportant comme un corps élastique jusqu'à la limite critique de rupture.

Stankowski et al (1993), *Lofti et Shing (1994)*, *Lourenco et Rots (1997)*, *Giambanco et al (2001)* ont proposé d'autres modèles d'interface basés sur la théorie de la plasticité pour les matériaux non-standards et sur la théorie mécanique de la rupture. Tous ces modèles adoptent le critère de la rupture de type Mohr-Coulomb et utilisent des variables internes pour décrire le comportement adoucissant du post-pic.

Il est important de souligner que la résistance des constructions en maçonnerie aux séismes dépend entièrement de la tenue mécanique des murs sous l'effet des forces latérales. Cependant, il est indispensable de connaître les différents paramètres qui gouvernent le comportement en cisaillement dans le but de prédire et évaluer la tenue sismique de ces structures. Il est donc nécessaire de modéliser et étudier expérimentalement la réponse des murs maçonnés soumis à un effort cyclique horizontal. Dans la plupart des cas cette réponse est caractérisée par un chargement maximal, une dégradation de la rigidité et enfin une dissipation de l'énergie (*Anthoine, Magonette et Mages (1996)*). Certains modèles sont proposés dans la littérature; ils considèrent que le mur représente un seul élément de structure caractérisé par une réponse non linéaire sous l'effet des efforts de cisaillement (*Benedetti et Benzoni (1984)*). Dans ce contexte, de nombreux résultats concernant la résistance latérale peuvent être obtenus par des modèles continus avec une force à la traction nulle (*Del Piero (1987)*) ou bien par l'approche « des ruptures faibles » (*Lofti et Shing (1991)*). En réalité la rupture des murs en maçonnerie dépend également des caractéristiques de ces composantes comme il a été indiqué plus haut, puisqu'elle représente un matériau purement composé. A partir de toutes ces réflexions, *Gambarotta et Lagomarsino (1997)* ont proposé un modèle prenant en compte l'endommagement, dans le but d'analyser la réponse des murs en maçonnerie de brique soumis à des chargements cycliques. L'avantage de ce modèle est qu'il prend en compte le comportement mécanique de chaque composant de la maçonnerie ainsi que l'interface. En particulier, une

loi de comportement fragile pour les briques et une loi spécifique pour le mortier qui est fonction de sa décohéation et du glissement. Cette dernière loi est établie sur la base de deux variables internes représentant le glissement avec frottement et l'endommagement de joint de mortier. Dans la même thématique *Raous, Cangémi et Cocu (1997)* modélisent l'évolution de l'endommagement sur l'interface entre deux corps déformables initialement adhérents, c'est l'une des premières tentative qui propose de traiter le problème de transition d'un état adhérent à un état frottant dans le plan tangent de l'interface et à un état de contact unilatéral dans la direction normale à l'interface. Le modèle en question s'inspire des travaux de *Frémond (1987) et Tien (1996)*.

II- Propriétés mécaniques des constituants de la maçonnerie utilisés

A/ Brique : Les briques en terre cuite utilisées pour les essais sont de type pleines et creuses. Leur dimension est de 210*100*50 mm³, les creux ont la dimension de 25*25*50mm³ et leur nombre est de 10 creux par brique, disposés sur deux rangs.

B/ Mortier : Le mortier que nous avons utilisé est un mortier usuel prêt à l'emploi, fabriqué à base de sable et ciment. La taille maximale des grains de sable est de 5mm, le ciment est de type portland 52.5. Les éprouvettes de mortier utilisées pour la mesure des caractéristiques mécaniques ont le même gâchage de mortier que celui utilisé pour la réalisation des montages de maçonnerie sur lesquels on a effectué les essais de cisaillement présentés dans le prochain paragraphe.

III- Comportements mécaniques des maçonneries soumises aux efforts de cisaillement

III-1 : Essais sur des prismes composés de deux briques pleines et creuses (dispositif N°1)

Le dispositif expérimental ci-dessous (Figure 1) a été conçu pour étudier à l'échelle locale le comportement en cisaillement d'un assemblage simple de deux briques (pleines et creuses) avec un joint de mortier d'une épaisseur de 10mm.

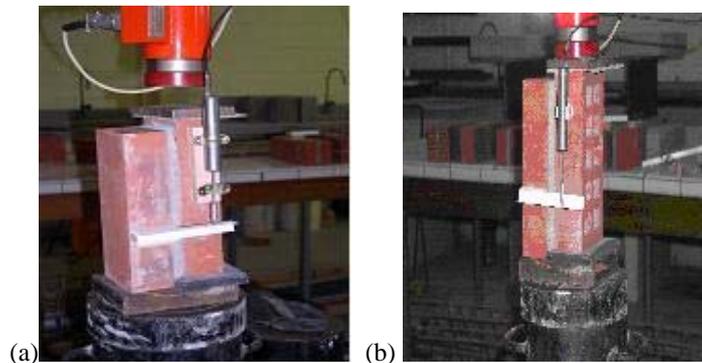


Figure 1. Dispositif N°1 d'essai de cisaillement (a) Briques pleines (b) Briques creuses

Les échantillons ont été soumis à un chargement monotone croissant jusqu'à rupture. Les capteurs placés sur la brique nous permettent de prélever le déplacement relatif entre les deux briques. L'essai a été piloté en effort. Nous appelons la force de rupture la force maximale atteinte au cours de l'essai.

Afin de déterminer une loi de comportement en cisaillement, nous avons tracé la courbe contrainte de cisaillement – déplacements relatifs présentée et commentée dans les paragraphes suivants.

III-1-1- Résultats expérimentaux

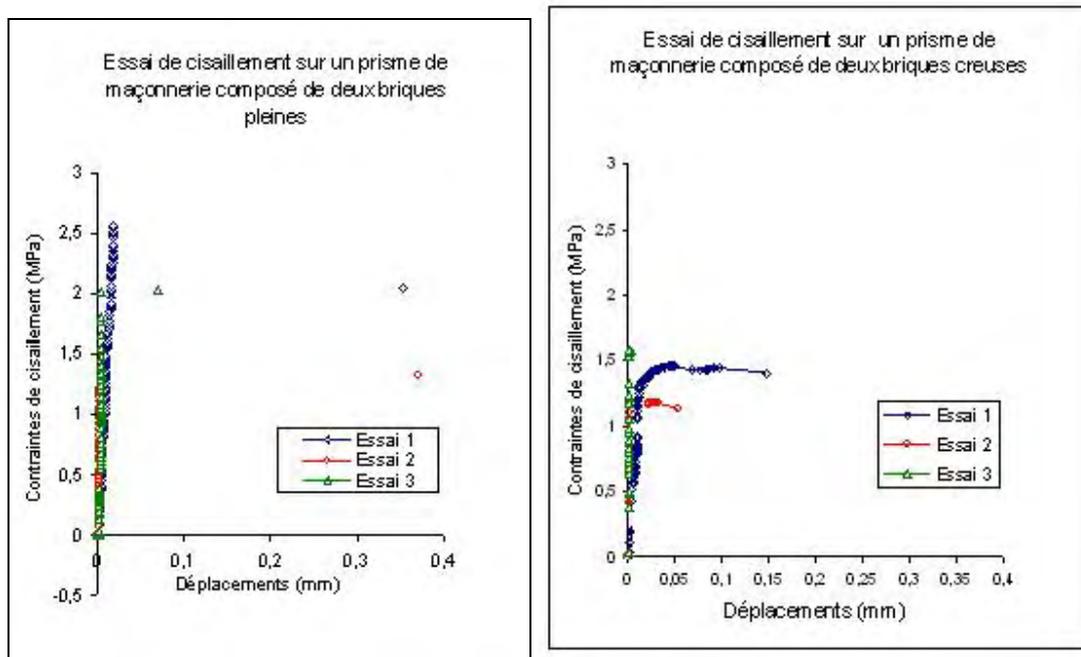


Figure 2. Résultats expérimentaux (Dispositif N°1) (a) Briques pleines (b) Briques creuses

III-1-2- Commentaires

Les résultats expérimentaux obtenus sur les assemblages en briques pleines et creuses sont présentés sur la figure 2 (a) et 2 (b) respectivement. Le comportement mécanique des prismes est caractérisé par un comportement très rigide pour le domaine élastique. Le déplacement mesuré est de l'ordre de quelques microns. Les courbes (figure 2. (a)) montrent une différence remarquable sur la contrainte limite de rupture qui est de 2.6MPa, 1.6MPa et 2.3MPa pour l'essai 1, 2 et 3. On a constaté la même chose sur les assemblages en briques creuses (figure 2. (b)) mais avec une dégradation de la limite de rupture qui est 1.6Mpa, 1.45Mpa et 1.2Mpa pour les essais 1, 2 et 3 respectivement. Une fois la contrainte maximale atteinte, on remarque que le comportement des prismes en briques pleines est fragile contrairement à la réponse des prismes en briques creuses qui est caractérisé par un comportement d'adoucissement puis par un mouvement de glissement entre les briques adjacentes (figure 2. (b)). Pour des montages identiques, conçus avec les mêmes matériaux et dans des conditions plus au moins semblables, on obtient bien une différence de la contrainte limite de rupture. Celle-ci va induire des modes de rupture totalement différents d'un échantillon à l'autre. Ceci peut être expliqué par l'analyse de la maçonnerie à une échelle locale où plusieurs facteurs externes et même internes pourront intervenir sur la réponse de ces prismes sans pouvoir les contrôler expérimentalement. On pense que ces effets locaux pourront disparaître dans le cas où on doit analyser les maçonneries à une autre échelle notamment à une échelle réelle.

III-2 : Essai sur des prismes composés de deux et trois briques creuses (dispositif N°2)

Toujours dans le but de décrire le comportement des maçonneries à l'échelle locale. On s'est intéressé cette fois à comparer la réponse des prismes de maçonnerie composés de deux et trois briques creuses connectées par des joints de mortier d'une épaisseur de 10mm soumises à des essais de cisaillement. Dans ces essais les prismes testés sont introduits dans un moule en acier comme le montre la figure 3 (a) et (b). Ce dispositif a été conçu pour maintenir les prismes et également pour bloquer les déplacements horizontaux pendant le processus de chargement.

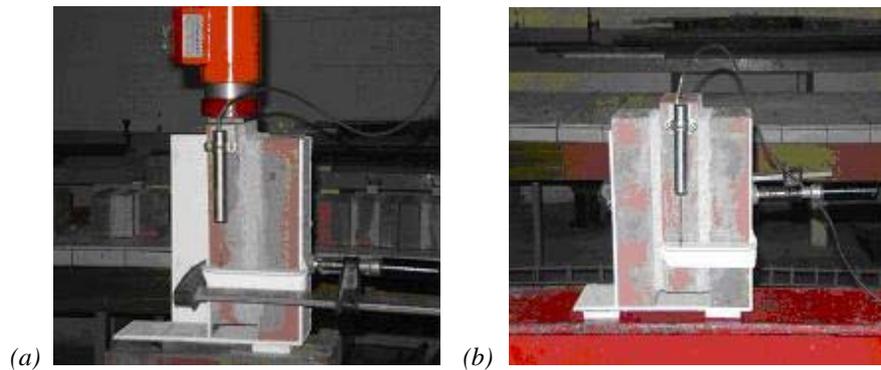


Figure 3. Dispositif N°2 d'essai de cisaillement (a) Deux briques creuses (b) Trois briques creuses

III-2-1- Résultats expérimentaux

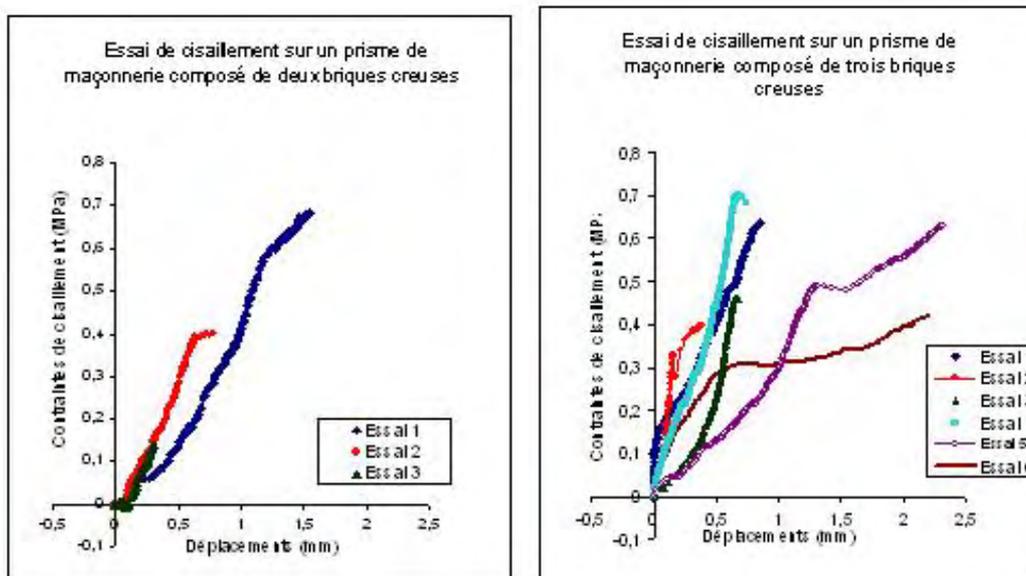


Figure 4. Résultats expérimentaux (Dispositif N°2) (a) Deux briques creuses (b) Trois briques creuses

III-2-2- Commentaires

La dispersion des résultats obtenus sur les mêmes types de prismes, comme le montre les courbes ci-dessus (figure 4 (a) et (b)) concernant l'assemblage de deux et trois briques creuses, s'explique par le fait que dans les briques creuses généralement les tétons du mortier ont une distribution très arbitraire. Ce paramètre est extrêmement difficile à contrôler lors de la mise en œuvre. La confrontation de ces résultats entre deux briques et trois briques creuses (figure 4 (a) et (b)) montre bien que les ordres de grandeur de la contrainte limite de rupture (0,4 – 0,7MPa) et les déplacements (1-2mm) correspondants sont très comparables. Ce qui nous permet de constater que les prismes composés par deux ou trois briques creuses ont un comportement similaire sous l'effet de cisaillement.

IV- Conclusion

L'étude expérimentale du comportement en cisaillement de différents prismes de maçonnerie présentée dans cet article a montré que le comportement de ces derniers est caractérisé par un comportement non linéaire. Nous avons observé un comportement élastique rigide jusqu'à la rupture suivi par un glissement de frottement. Les résultats obtenus sur les prismes en briques creuses ont montré une large dispersion. Ceci est dû essentiellement à la répartition non uniforme des picots d'une part et des défauts locaux des composants de la maçonnerie d'autre part. Nous avons constaté d'après la comparaison entre les essais effectués sur un prisme de deux briques et trois briques creuses, qu'ils possèdent pratiquement le même comportement. Par conséquent, le choix d'une cellule de base n'a pas une grande importance à l'échelle locale. Les modes de rupture trouvés confirment l'hétérogénéité de la maçonnerie.

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 la loi de comportement à prendre en compte dans des calculs par éléments finis.

Dans cet article, nous avons principalement mis l'accent sur nos travaux expérimentaux. Lors de l'exposé nous présenterons l'autre volet de notre contribution, à savoir la modélisation numérique des interfaces dans le cadre des lois d'interfaces évoquées dans l'introduction.

Références :

- Anthoine, Magonette et Magenes (1996)*, Anthoine A., Magonette G. et Magenes G., Shear-compression testing and analysis of brick masonry walls, in G. Duma (ed), Proc. 10th European conf. Earthquake eng., Vol. 3, Balkema, Rotterdam, 1995, pp. 1657-1662.
- Benedetti et Benzoni (1984)*, Benedetti D., Benzoni G.M., A numerical model for seismic analysis of masonry building: Experimental Correlations, Earthquake eng. Struct. dyn. 12, 817-831.
- Del Piero (1987)*, Del Piero G., Constitutive equation and compatibility of the external loads for linearly elastic masonry-like materials, Meccanica 24, 150-162.
- Frémond (1987)*, Frémond M., Adhérence des solides, Journal de Mécanique théorique et Appliquée, 6, pp. 383-407.
- Tien (1996)*, Truong Tien Dinh., Contact avec adhérence, Thèse de mécanique, Université de Paris 6.
- Giambanco et al (2001)*, Giambanco G., Rizzo S., Spallino R., Numerical analysis of masonry structures via interface models, Comput. Methode. Appl. Mech. Engrg., 190, 6493-6511. Elsevier Science Publisher.
- Gambarotta et Lagomarsino (1997)*, Gambarotta G., Lagomarsino S., 1997, Damage models for the seismic response of brick masonry walls. Part I: The continuum model and its application, Earthquake eng. Struct. Dyn. 26, 44 1-462.
- Lofti et Shing (1994)*, Lofti H. R., Benson Shing P., Interface model applied to fracture of masonry structures, J. struct. eng. div. ASCE 120 (1), 63-80.
- Lofti et. Shing (1991)*, H. R., Benson Shing P., An appraisal of smeared crack models for masonry shear wall analysis, Comput. Struct. 41, 413-425.
- Lourenco et Rots (1994)*, Lourenco P. B., Rots J. G., Blaauwendraad J., Implementation of an interface cap model for the analysis, Prague, pp. 463-472.
- Page (1978)*, Page A. W., Finite element model for masonry, J. struct. eng. div. ASCE 104, 1267-1285.
- Stankowski et al (1993)*, Stankowski T., Runesson K., Sture S., Fracture and slip of interfaces in cementitious composites, J. Eng. Mech. (ASCE) 119 (2), 292-314.
- Raous, Cangémi et Cocu (1997)*, Raous M., Cangémi L., Cocu M., Un modèle couplant adhérence et frottement pour le contact entre deux solides déformables, Mécanique de solides, 325, pp. 503-509.