

---

# Comportement mécanique des structures en béton armé avec remplissage en maçonnerie

Ismail LAYADI<sup>1,2,3</sup>, Jean-Patrick PLASSIARD<sup>1,2</sup>, Pascal PERROTIN<sup>1,2</sup>, Olivier PLE<sup>1,2</sup>, Ali MESSABHIA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université Savoie Mont Blanc, LOCIE, F-73000 Chambéry, France

<sup>2</sup> CNRS, LOCIE, F-73000 Chambéry, France

<sup>3</sup> Université de Tébessa, Laboratoire de Génie Civil Appliqué, 12002 Tébessa, Algérie

Courriel : [ismail.layadi@univ-smb.fr](mailto:ismail.layadi@univ-smb.fr) ; [jean-patrick.plassiard@univ-savoie.fr](mailto:jean-patrick.plassiard@univ-savoie.fr) ; [pascal.perrotin@univ-savoie.fr](mailto:pascal.perrotin@univ-savoie.fr) ; [olivier.ple@univ-savoie.fr](mailto:olivier.ple@univ-savoie.fr) ; [messabhia@univ-tebessa.dz](mailto:messabhia@univ-tebessa.dz)

---

*RÉSUMÉ.* Les structures en béton armé avec remplissage en maçonnerie constituent la majorité des constructions en Algérie. L'analyse des tremblements de terre au cours de ces dernières années montre que ce type de structures peut subir de graves dommages, la plupart des dégâts occasionnés sont dues essentiellement à la forte interaction entre le mur de remplissage et la structure en béton armé. Cette interaction conduit à une réponse fortement non linéaire et des mécanismes de rupture souvent complexes. Dans la plupart des cas, on néglige l'influence du remplissage sur le comportement de l'ensemble, ce qui conduit à des imprécisions considérables dans la prédiction de la résistance. L'ensemble des expériences menées jusqu'à présent montre que ces hypothèses ne sont pas réalistes et que la présence du remplissage affecte amplement la réponse de la structure.

*En se basant sur des données expérimentales, l'objectif de ce travail est de développer un modèle de référence qui permettra d'étudier la contribution et l'influence du remplissage sur le comportement globale de la structure.*

*ABSTRACT.* The reinforced concrete structures with masonry infill correspond to the majority of constructions in Algeria. The analyses of past earthquakes in recent years shows that such structures can face serious damage. Most of the damages are due to the strong interaction between the infill wall and the reinforced concrete structure. This interaction leads to significant inaccuracies in the strength prediction. All the experiences so far shows that these assumptions are not realistic and the presence of the infill wall affects the response of the structure.

*Based on experimental data, the objective of this work is to develop a reference model capable to study the contribution and the effect of infill walls on the overall behaviour of the structure.*

*MOTS-CLÉS :* maçonnerie de remplissage, portique en béton armé, chargement latéral, joint de mortier, micro modélisation, modèle d'endommagement.

*KEY WORDS:* masonry infill, reinforced concrete frame, lateral load, mortar joint, Micro modelling, damage model.

---

## 1. Introduction

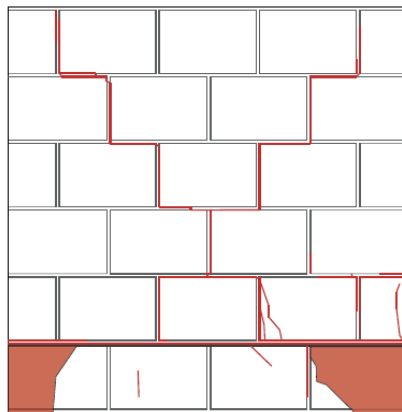
L'analyse des tremblements de terre au cours de ces dernières années montre que les structures en béton armé avec remplissage en maçonnerie peuvent subir de graves dommages dont la plupart sont dues essentiellement à la forte interaction entre le mur de remplissage et son cadre de portique. Cette interaction peut provoquer la rupture, voir l'effondrement des bâtiments en portiques autostables. En effet, bien que le remplissage permette d'augmenter la rigidité et la résistance statique de l'ensemble, des travaux de recherches ont montrés que la présence du remplissage en maçonnerie peut affecter le comportement de la structure sous sollicitations dynamique il en résulte alors une perte de résistance, de rigidité et de capacité de dissipation d'énergie.

D'autre part, le comportement de ce type de structure est fortement lié aux caractéristiques mécaniques de la maçonnerie et de ses constituants qui peuvent être des briques ou blocs béton avec joints remplis (mortier, colle) ou vides (joint sec). La différence entre ces propriétés mécaniques étant un facteur primordial du comportement de la structure. En effet, les propriétés mécaniques du joint de mortier, et plus particulièrement, son comportement en cisaillement jouent un rôle prépondérant [STA 10], car ils correspondent au point de faiblesse dans les structures en maçonnerie et gouverne le comportement non linéaire.

Plusieurs études se sont penchées sur cet aspect avec une attention particulière portée au développement des techniques de modélisation capable de reproduire le comportement de manière adéquate. La stratégie de modélisation adoptée dans ce travail est basée sur la technique de la micro-modélisation simplifiée. La modélisation est effectuée en 3D sous le code éléments finis Cast3m en utilisant des éléments volumiques et en introduisant des lois de comportements adaptées pour chaque type de matériau de la structure.

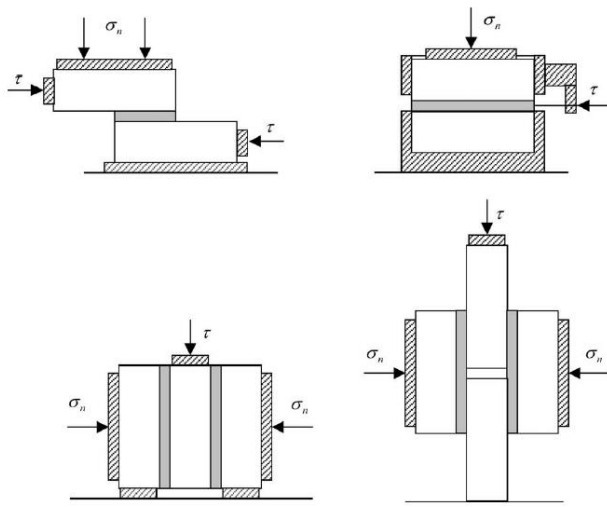
## 2. Comportement et modes de rupture

Les recherches expérimentales antérieures ont permis d'identifier différents mécanismes de rupture possibles de ce type de structures. Les spécimens testés sont généralement des portiques en béton armé remplis (et/ou non remplis) en maçonnerie de différents nombres d'étages et de travées. Au but de reproduire un chargement sismique, le chargement considéré est souvent latéral. A un chargement latéral relativement faible, le panneau de remplissage tend à se séparer du cadre de portique et forme de plus en plus ce qu'on appelle les diagonales équivalentes. Lors de l'augmentation du chargement, la rupture peut avoir lieu au niveau du mur de remplissage et/ou de son cadre de portique [AST 11]. La figure 1 montre le mode de rupture d'un mur en maçonnerie soumis à un chargement horizontal dans le plan combiné avec un chargement vertical constant, qui reproduit généralement le poids d'étages supérieurs. La rupture se produit en zigzag le long des joints verticaux et horizontaux avec une rupture en traction des briques du lit inférieur, comme il est bien déterminé dans le travail de [VOG 15].



**Figure 1.** Modes de rupture d'un mur en maçonnerie soumis à un chargement cyclique latéral et chargement vertical [VOG 15]

L'analyse évoquée ci-dessus nous affirme le rôle prépondérant du joint de mortier dans la réponse de la structure en maçonnerie qui constitue son point de faiblesse et gouverne le comportement non linéaire de l'ensemble. Cette réponse non linéaire est contrôlée essentiellement par la surface de contact entre la brique et le joint de mortier connu sous le nom d'interface brique-mortier. Dans ce qui suit, nous allons porter une attention particulière au comportement de la liaison brique/mortier au cours d'un essai de cisaillement. Les essais usuels pour évaluer la résistance au cisaillement des joints de mortier sont représentés sur la figure 2.



**Figure 2.** Configurations d'essais expérimentales pour évaluer la résistance au cisaillement des joints de mortier [CRI 97]

Dans les travaux de [ABD 05] et [FOU 06], des essais sur couplets et triplets composés de briques et joints de mortier ont été menés avec deux types de briques : pleines et creuses afin de caractériser le comportement au cisaillement de la maçonnerie au niveau de l'interface brique-mortier. Les essais ont été réalisés avec et sans effort de confinement. Trois modes de rupture peuvent être envisagés indépendamment du type de brique selon [ABD 05], soit une rupture au niveau de l'une des interfaces brique/mortier (Mode a), rupture dans chaque interface et dans le mortier à la fois (Mode b), rupture à travers les briques (Mode c). Seuls les deux Modes (a) et (b) ont été obtenus par [FOU 06]. L'ensemble des essais conduits par [FOU 06] sur couplets et triplets possède un comportement en cisaillement très rigide dans la zone élastique, suivi d'un comportement fragile après la limite de rupture pour les briques pleines et adoucissant suivi par glissement entre les briques adjacentes pour les briques creuses. D'autre part, les essais effectués avec un effort de confinement ont montré que la résistance au cisaillement des joints de mortier augmente avec le niveau de confinement appliqué. Le comportement post-pic, dans ce cas, est caractérisé par une contrainte résiduelle dont la valeur est fonction du niveau de confinement.

### 3. Modélisation numérique

La stratégie de modélisation utilisée dans ce travail est basée sur l'approche par micro modélisation qui est généralement limitée à de petites structures. Elle permet de décrire de façon plus réaliste le comportement de la maçonnerie ainsi que les différents modes de rupture peuvent se produire, et plus particulièrement l'interaction au niveau de l'interface brique/mortier. Chaque constituant de la structure est décrit avec sa propre loi de comportement. D'après la littérature, les modèles développés dans le cadre de cette approche sont souvent établis en formulation bi dimensionnelle et en contrainte plane. La brique dans le mur de remplissage étant considérée comme des éléments élastiques continus, cependant, des modèles basés sur la théorie de plasticité peuvent être utilisés pour la brique [LOT 91], et pour le joint de mortier [LOU 97], [FOU 06].

Récemment, un modèle d'endommagement anisotrope développé initialement pour le béton par [SEL 13] a été adapté pour la maçonnerie sans introduire un élément d'interface [DOM 13]. Le modèle a montré sa capacité de considérer différents types de chargements et de représenter les différents types de comportement observés expérimentalement : L'ouverture et la fermeture des fissures, restitution de la rigidité initiale, la rotation des fissures dans le cas d'un chargement non radial, endommagement anisotrope en traction et en compression, etc. Ce modèle a été adapté dans notre travail pour reproduire le comportement de la maçonnerie en simulant un essai de cisaillement de triplet en brique issu de la littérature.

#### 3.1. Description du modèle d'endommagement

Le modèle d'endommagement étant anisotrope tient compte l'ouverture et la fermeture des fissures et utilise seulement des paramètres d'entrée mesurables. Le modèle adopte la représentation vectorielle classique des tenseurs symétriques de contrainte et déformation [DOM 13], [SEL 13] :

$$\vec{\sigma}^t = (\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{zz} \tau_{xy} \tau_{xz} \tau_{yz}) \quad [1]$$

$$\vec{\varepsilon}^t = (\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{zz} \ \gamma_{xy} \ \gamma_{xz} \ \gamma_{yz}) \quad [2]$$

La loi de comportement élastique peut être écrite comme suit au moyen d'une contrainte effective, utilisant la matrice de rigidité du matériau non endommagé  $S^0$  et la déformation élastique  $\vec{\varepsilon}$  :

$$\vec{\sigma} = S^0 \times \vec{\varepsilon} \quad [3]$$

Cette contrainte est divisée en contrainte positive de traction et négative de compression avec un critère de Rankine pour la traction et Drucker Prager pour la compression pour évaluer le tenseur d'endommagement en traction  $D^t$  et en compression  $D^c$ , respectivement :

$$\vec{\sigma} = \vec{\sigma}^t + \vec{\sigma}^c \quad [4]$$

$$\vec{\sigma}^{DP} = \sqrt{J^{2d}/6} + \delta \frac{I^1}{3} \quad [5]$$

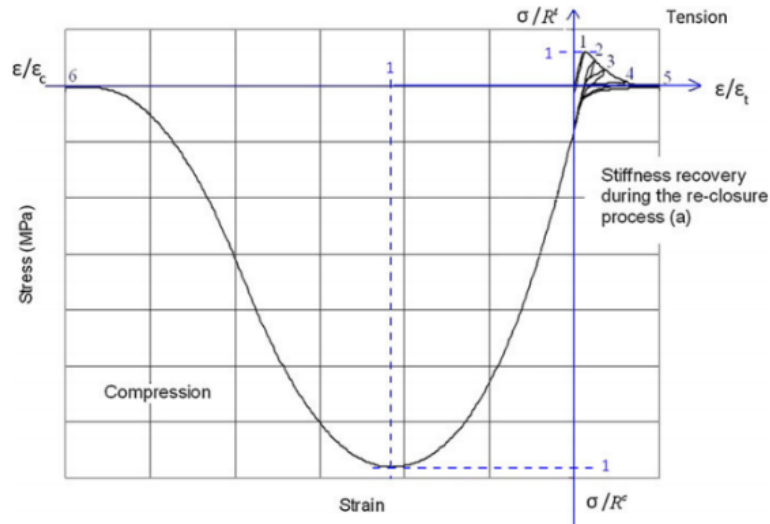
Avec  $J^{2d}$  le second invariant du déviateur de  $\vec{\sigma}^c$ ,  $I^1$  la trace de  $\vec{\sigma}^c$  et  $\delta$  le constant de Drucker Prager qui dépend de l'angle de frottement interne  $\phi$  :

$$\delta = \frac{2\sqrt{3} \sin \phi}{3 - \sin \phi} \quad [6]$$

La contrainte  $\vec{\sigma}$  utilisée aux points d'intégration de chaque élément finis du modèle est exprimée en fonction des tenseurs d'endommagement  $D^t$  et  $D^c$  et les contraintes effective par l'équation suivante :

$$\vec{\sigma} = (1 - D^c) \times ((1 - D^t) \times \vec{\sigma}^t + \vec{\sigma}^c) \quad [7]$$

La loi de comportement du modèle sous un chargement cyclique axiale est représentée par la courbe ci-dessous sur la figure 3.

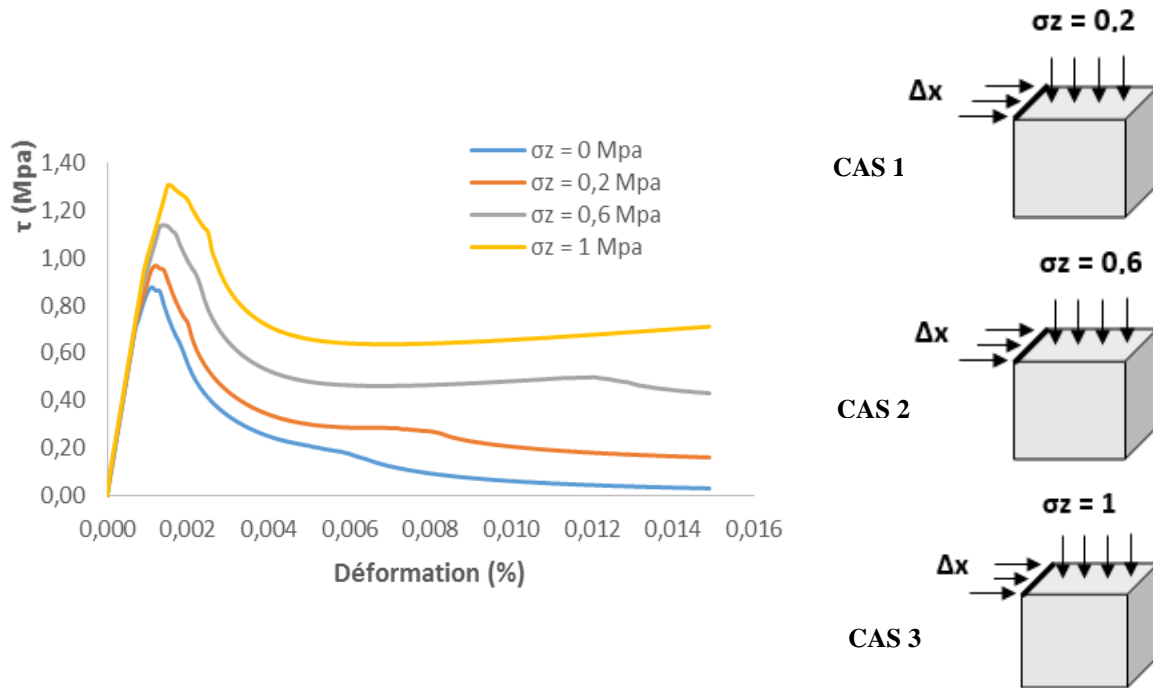


**Figure 3.** Comportement du modèle sous chargement cyclique axiale [STA 12]

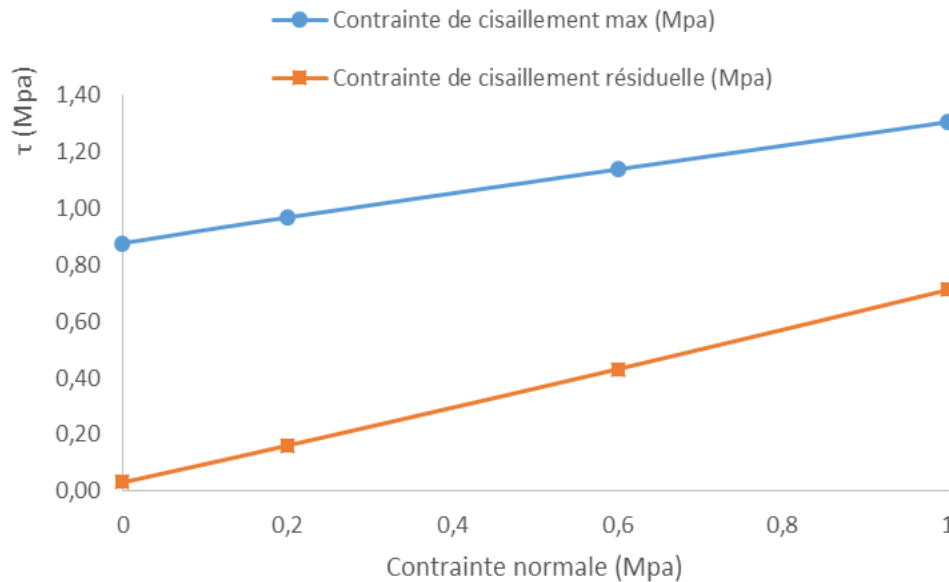
### 3.2. Application du modèle à l'échelle local

Afin d'évaluer la performance du modèle en cisaillement et identifier ses paramètres, une simulation d'un essai de cisaillement sur un cube de 1 seul élément a été menée. Les figures 4 et 5 présentent les résultats de cette simulation prenant en compte l'effet de la contrainte normale de confinement sur le comportement en cisaillement. L'élément est soumis à un effort de cisaillement latéral pour différentes valeurs de confinement de 0 (sans confinement), 0.2, 0.6 et 1 Mpa. Le modèle a réussi à reproduire le comportement adéquat en cisaillement prenant en compte la contrainte de cisaillement résiduelle qui augmente avec le niveau de confinement appliqué, comme indiqué dans la figure 4. La loi de comportement dans ce cas, se traduit par une dépendance affine de la résistance au cisaillement au pic à la contrainte normale pour des contraintes normales positives (figure 5). La

valeur à 0.0149 % est également considérée car la contrainte a alors grandement chuté et tend à se stabiliser. Bien que la contrainte varie encore légèrement dans ces gammes de déformations, elles sont assimilées à des contraintes résiduelles afin de pouvoir évaluer le comportement pour les grandes déformations.



**Figure 4.** Comportement du modèle en cisaillement sous différentes valeurs de confinement

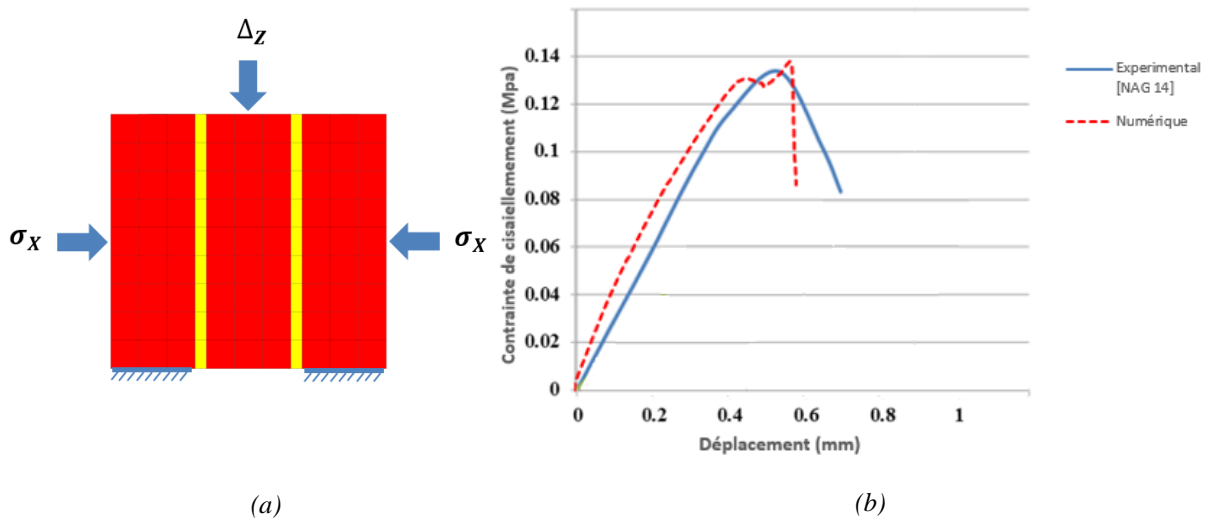


**Figure 5.** Influence de confinement sur la contrainte de cisaillement max et résiduelle

### 3.3. Modélisation d'un essai de cisaillement de triplet

L'analyse numérique a été effectuée en premier temps à l'échelle locale (échelle de constituants) en reproduisant le comportement d'un essai sur triplet de brique issu de la littérature [NAG 14]. Les triplets sont composés de deux briques en terre cuite d'une dimension de 220x100x75mm<sup>3</sup> liées avec un joint de mortier d'une épaisseur de 10mm.

La stratégie de modélisation adoptée dans ce travail est basée sur celle de la micro modélisation simplifiée. La modélisation est effectuée en 3D sous le code en éléments finis Cast3M en utilisant des éléments finis volumique de type CUB8. Le joint de mortier dans ce cas est considéré comme un élément continu en élément finis volumique de type CUB8 sans toutefois introduire un élément d'interface au contact avec la brique comme le modèle correspondant est présenté à la figure 6. Les briques suivent un modèle élastique isotrope, toutefois, le joint de mortier avec le modèle élasto-plastique endommageable [SEL 13] dont les paramètres des deux éléments correspondent à ceux de [NAG 14]. Les caractéristiques mécaniques de brique et mortier obtenues par [NAG 14] et utilisés dans le modèle numérique sont indiqués dans les tableaux 1 et 2.



**Figure 6.** Simulation numérique sous le code Cast3M : maillage du modèle (a), et confrontation des résultats numériques sous Cast3M et expérimentaux obtenus par [NAG14] (b)

**Tableau 1.** Caractéristiques mécaniques de la brique : expérimentales [NAG 14] et numérique utilisées sous Cast3M.

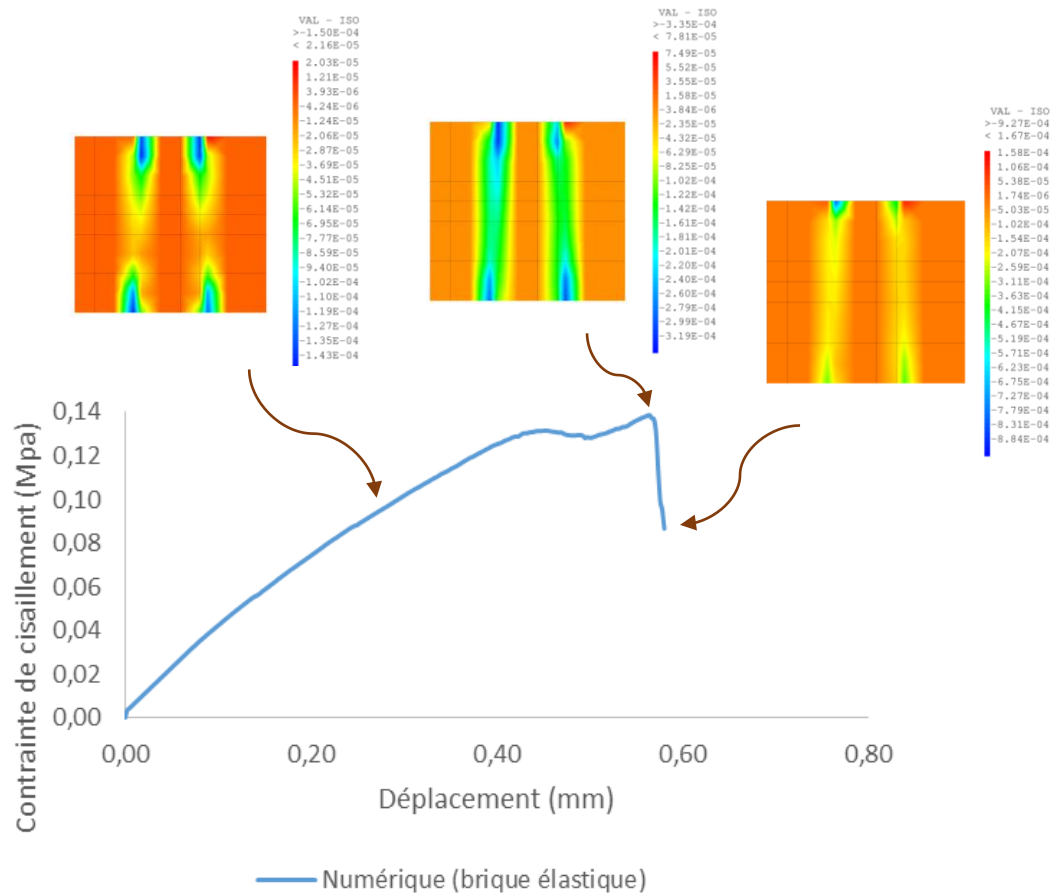
| Brique | Expérimental [NAG 14] | Numérique sous Cast3M |                        |
|--------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
|        | Module de young (Mpa) | Module de young (Mpa) | Coefficient de poisson |
|        | 3070                  | 3070                  | 0.13                   |

**Tableau 2.** Caractéristiques mécaniques de mortier : expérimentales [NAG 14] et numérique utilisées sous Cast3M.

| Mortier | Expérimental [NAG 14] |                                   |                    | Numérique sous Cast3M |                        |                                   |                    |                                |                                       |
|---------|-----------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
|         | Module de young (Mpa) | Résistance à la compression (Mpa) | Déformation au pic | Module de young (Mpa) | Coefficient de poisson | Résistance à la compression (Mpa) | Déformation au pic | Résistance à la traction (Mpa) | Coefficient de drucker prager (Delta) |
|         | 5385                  | 18,19                             | 0.0083             | 5385                  | 0.13                   | 12,19                             | 0.0083             | 1                              | 0,2                                   |

La figure 6 illustre le comportement de l'interface en termes de contrainte de cisaillement et de déplacement tangentiel comparé au résultat d'essai expérimental de [NAG 14]. D'après les courbes, le résultat est proche du comportement expérimental de triplet considérant la brique comme élastique et le joint de mortier avec le modèle d'endommagement décrit précédemment [SEL 13], par contre, la rigidité est surestimée. L'évolution de l'endommagement au cours de l'essai pour trois valeurs de déplacement imposé : 0.3, 0.56 et 0.58mm est aussi présentée sur la figure 7. Cet essai montre notamment que l'endommagement n'est pas homogène dans l'interface et ceci tout au long de l'essai. On ne peut donc se contenter d'étudier le joint seul pour caractériser les

paramètres numériques d'un modèle qui soit représentatif de l'essai sur triplet. Malgré la symétrie, l'essai est donc non homogène et il sera indiqué de respecter la géométrie et les conditions limites lors de la modélisation de l'essai expérimental.

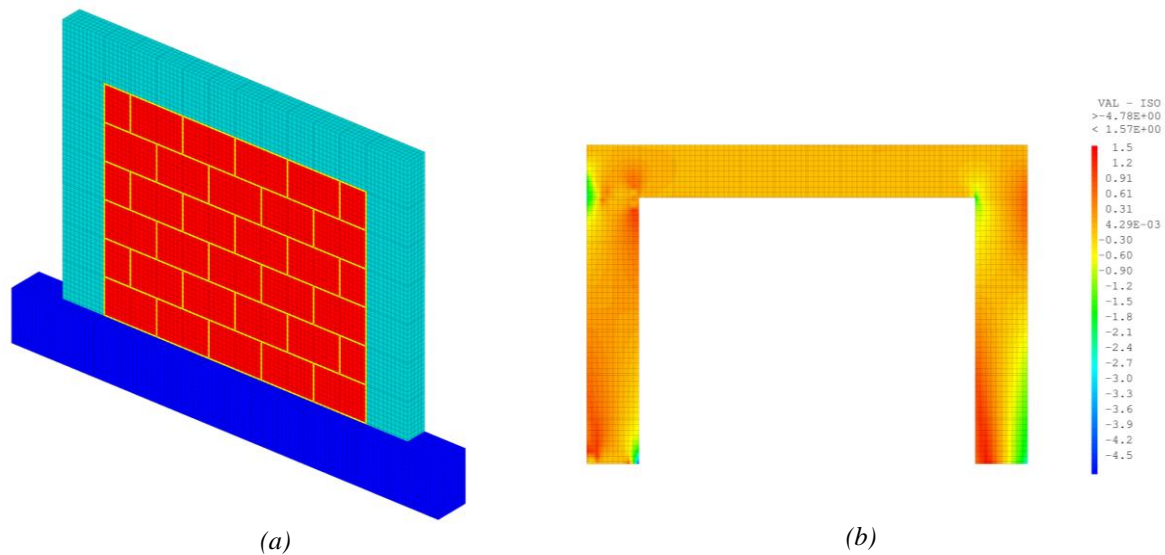


**Figure 7.** Evolution de l'endommagement au cours de l'essai

### 3.4. Application du modèle à l'échelle globale

Notre objectif principal est de développer un modèle de référence qui permettra de reproduire le comportement des portiques remplis en maçonnerie sous un chargement latéral afin d'étudier l'influence du remplissage sur le comportement de l'ensemble. A cet effet, une première modélisation numérique en 3D est effectuée sous le code éléments finis Cast3m en utilisant des éléments volumiques et en introduisant des lois de comportements adaptées pour chaque type de matériau de la structure (Béton, acier, brique et joint de mortier), comme il est montré sur la figure 8.a. Cette modélisation a pour but de construire un modèle numérique capable de reproduire le comportement complexe de ce type de structure et de pouvoir confronter les résultats obtenus à ceux issus de la partie expérimentale devant être réalisée prochainement.

Le modèle d'endommagement de [SEL 13] décrit précédemment est utilisé pour modéliser le comportement de béton, la brique en terre cuite et le joint de mortier. La géométrie du modèle nécessite un maillage complexe, adaptée au béton, à la brique au joint de mortier et aux aciers présents. Pour l'acier, un modèle elasto-plastique standard a été utilisé. Dans un premier temps, le portique a été modélisé sans remplissage. L'étape à venir correspond à étudier la prise en compte de la maçonnerie avec des briques élastique dans un premier temps puis avec le modèle de [SEL 13]. La figure 8.b présente la simulation du portique sans maçonnerie, à titre d'exemple. Le portique est soumis à un chargement vertical maintenu constant, puis à un déplacement horizontal appliqué en tête de poteau gauche. Ce cas de figure sera traité expérimentalement afin de vérifier que le comportement de la structure en béton armé soit correctement déduit des essais élémentaires précédent. De même, la simulation du portique avec remplissage sera déduite des calibrations réalisées sur les murets et triplets notamment et sera comparée aux essais expérimentaux.



**Figure 8.** Géométrie et maillage du portique rempli en maçonnerie sous Cast3M (a), et résultats de simulation numérique en termes de contrainte en 'zz' pour le modèle d'un cadre sans remplissage (b)

#### 4. Conclusion

Ce travail propose une modélisation des structures en béton armé remplis en maçonnerie. La capacité d'un modèle d'endommagement [SEL 13] de reproduire le comportement adéquat en cisaillement à l'échelle des constituants a été évaluée à travers un essai de cisaillement sur triplet en brique. Les résultats numériques en termes de contrainte de cisaillement-déplacement tangentiel étaient proches de l'essai expérimental supposant un comportement élastique pour la brique en appliquant le modèle d'endommagement pour le joint de mortier. L'application du modèle à une structure plus large en ce qui concerne un portique remplis en maçonnerie reste encore à développer.

Parallèlement à cette étude des essais expérimentaux du type « push out tests » seront réalisées prochainement sur des structures en béton armé avec remplissage en maçonnerie. Ces essais utilisés au sein du laboratoire LOCIE lors d'études précédentes [EYM 15], et [ELN 15] consistent à appliquer une charge verticale maintenue constante pendant l'application d'un déplacement horizontal en tête de portique. Une série d'expériences caractérisant le comportement de tous les matériaux et de leurs interfaces est aussi programmé. La confrontation modélisation/expérimentation permettra de décrire de façon plus réaliste le comportement de la maçonnerie. Elle permettra, notamment de caractériser les différents modes de rupture qui peuvent se produire.

#### 5. Bibliographie

- [ABD 05] ABDOU L., Modélisation du comportement mécanique des murs en maçonnerie chargés dans leur plan, Thèse de doctorat, Université de Marne-La-Vallée, France, 2005.
- [AST 11] ASTERIS PG., KAKALETSIS DJ., CHRYSOSTOMOU CZ., SMYROU EE., « Failure modes of in-filled frames », *Electron J Struct Eng*, 2011, 11(1), 11 – 20.
- [CRI 97] CRISAFULLI FG., Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills, Thèse de doctorat, Université de Canterbury, New Zealand, 1997.
- [DOM 13] DOMEDE N., SELIER A., STABLON T., « Structural analysis of a multi-span railway masonry bridge combining in situ observations, laboratory tests and damage modelling », *Engineering Structures*, 2013, 56, 837–849.
- [ELN 2015] EL NABOUCH R., BUI Q.-B., PERROTIN P., PLE O., PLASSIARD J.-P., « Modélisation numérique de structures en pisé : analyses et recommandations », RUGC15, Biarritz, France, 27-29 mai 2015.



- [EYM 2015] EYMARD M., PERROTIN P., PLASSIARD J.-P., LE FAY S., « Comportement mécanique d'un enduit projeté sur son support pour la réhabilitation thermique des bâtiments-expérimentations à l'échelle d'un mur », RUGC15, Biarritz, France, 27-29 mai 2015.
- [FOU 06] FOUCAL F., Contribution à la modélisation numérique des interfaces dans les structures maçonnées, Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, France, 2006.
- [LOT 91] LOTFI HR., SHING PB., « An appraisal of smeared crack models for masonry shear wall analysis », *Computers and Structures*, 1991, 41(3), 413 – 425.
- [LOU 97] LOURENÇO PB., ROTS JG., « Multisurface interface model for analysis of masonry structures », *J Eng Mech*, 1997, 123(7), 660 – 668.
- [NAG 14] NAGARAJAN T., VISWANATHAN S., RAVI S., SRINIVAS V., NARAYANAN P., « Experimental approach to investigate the behaviour of brick masonry for different mortar ratios », International conference on advances in engineering and technology ICAET'2014, 29-30 mars 2014, Singapore.
- [SEL 13] SELIER A., CASAUX-GINESTET G., BUFFO-LACARRIERE L., BOURBON X., « Orthotropic damage coupled with localised crack reclosure processing. Part I : Constitutive laws », *Eng Fract Mech*, 2013, 97, 148–67.
- [STA 12] STABLON T., SELIER A., DOMEDE N., PLU B., DIELEMAN L., « Influence of building process on stiffness: numerical analysis of a masonry vault including mortar joint shrinkage and crack re-closure effect », *Mater Struct*, 2011, 45, 881–98.
- [STA 10] STAVRIDIS A., SHING PB., « Finite element modeling of nonlinear behavior of masonry infilled RC frames ». *J Struct Eng*, 2010, 136 (3), 285 – 296.
- [VOG 15] VÖGELI C., MOJSILOVIC N., STOJADINOVIC B., « Masonry wallettes with a soft layer bed joint: Behaviour under static-cyclic loading », *Engineering Structures*, 2015, 86, 16 – 32.