

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Effet du retrait du sol sur une maison expérimentale

Effects of soil shrinkage on an experimental house

Makki L.

Champlan, France (anciennement IFSTTAR)

Bourgeois E., Burlon S., Magnan J.-P., Duc M.

Université Paris-Est, IFSTTAR, Cité Descartes, Champs-sur-Marne, France

RÉSUMÉ : Cet article présente les résultats d'essais réalisés sur un modèle en vraie grandeur de maison en maçonnerie, construite sur des vérins pour simuler différentes distributions de tassements de sa fondation lors d'une période de sécheresse. Les résultats des observations faites lors de plusieurs essais sont présentés. Une modélisation numérique du comportement de la maison expérimentale a été effectuée. Pour le calcul tridimensionnel en éléments finis au moyen du logiciel CESAR-LCPC, on a utilisé des éléments de volume pour les parpaings, les joints en mortier et le béton des semelles et des chaînages, tandis que les armatures étaient représentées par des éléments linéiques superposés au maillage volumique. Pour représenter les conditions de l'étude expérimentale, trois calculs ont été effectués, en enlevant tous les appuis sous un quart de la maison, puis sous la moitié de la maison, puis sous un autre quart de la maison. Les calculs ont donné des résultats proches des mesures.

ABSTRACT: This paper presents the results of tests carried out on a full scale model house built on jacks to simulate the different settlement distribution of its foundations during a period of drought. Results of observations made during several tests are presented. A numerical analysis of the behaviour of the experimental house was realized. The three-dimensional finite element analysis using the FEM code CESAR-LCPC uses volumetric elements for the concrete blocks, the mortar joints and the concrete of the footing and of the wall ties, whereas the reinforcing bars are modelled using one-dimensional elements, superimposed to the volumetric mesh. Three analyses were performed, in order to match the conditions of the experiments: the supports were suppressed under one fourth, then the half, then another fourth of the house. The calculations gave results close to the measurements.

MOTS-CLÉS : maison individuelle, maçonnerie, retrait du sol, instrumentation, vérin hydraulique, modélisation, élément fini.

KEYWORDS: Single house, masonry, soil shrinkage, instrumentation, hydraulic jack, modelling, finite element.

1 INTRODUCTION

Les dommages produits par les effets de la sécheresse sont particulièrement fréquents dans les maisons individuelles à un seul niveau ou avec un étage, construites sur des fondations superficielles. Ces dommages résultent de la combinaison d'un aléa, le tassement produit par le retrait d'un sol argileux, et de la vulnérabilité de la construction, c'est-à-dire son incapacité à résister aux forces et moments créés par la perte partielle d'appui sous les fondations. Pour progresser dans la compréhension de ces dommages, la construction d'une maison expérimentale, que l'on pourrait soumettre à des cycles de retrait et gonflement du sol de fondation, mais aussi renforcer et retester ensuite, a été décidée. Ce travail a été effectué dans le cadre du projet ANR ARGIC (2007-2009 : Analyse du retrait-gonflement et ses incidences sur les constructions, sous la coordination du BRGM) et de l'opération de recherche du LCPC qui porte sur l'effet de la sécheresse sur les constructions (2006-2010). Pour maîtriser le calendrier de ces recherches, il a été décidé de concentrer l'étude sur le fonctionnement de la maison elle-même, sans dépendre du comportement au cours du temps d'un sol argileux sous les fondations, par nature aléatoire. La maison a été construite hors sol, dans un hall d'essai du Centre d'expérimentation routière du Centre d'Études Techniques de l'Équipement Normandie-Centre à Rouen. Elle est connue sous le nom de « Station MISS » (Maison Individuelle Soumise à la Sécheresse). Le choix a été fait de commander à un maçon la construction d'une maison de dimensions standard, en suivant les prescriptions des normes (DTU) applicables à la construction des maisons individuelles. La seule particularité de cette maison est que les semelles de

fondation ont été construites sur des appuis métalliques que l'on peut remplacer par des vérins dans les zones où l'on veut modifier les conditions d'appuis des fondations. Des mesures des mouvements verticaux des fondations, des déformations des chaînages et des efforts dans les vérins ont été organisées, ainsi qu'un suivi visuel de la formation des fissures dans les murs et les fondations. Cet article présente la construction du dispositif expérimental et les résultats des premiers essais. Il présente aussi l'analyse numérique en éléments finis effectuée au LCPC en utilisant le module MCNL du code de calcul CESAR-LCPC et compare les résultats des calculs avec les observations faites sur la maison expérimentale.

2 ÉLÉMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

Différents auteurs ont travaillé sur le fonctionnement mécanique des constructions en maçonnerie pour comprendre leur comportement sous différentes sollicitations, telles que la compression uniaxiale, la traction uniaxiale, le chargement biaxial et le cisaillement (Fouchal 2006, Hendry 2001). Ces sollicitations élémentaires se combinent dans la réponse mécanique de l'ouvrage en maçonnerie et contribuent à ce que l'on peut appeler la « résistance » de la construction. Ces auteurs sont arrivés à la conclusion que les discontinuités inhérentes à la maçonnerie, c'est-à-dire les interfaces entre les briques et le mortier, fragilisent son comportement et que la rupture des structures en maçonnerie est essentiellement due à la différence des propriétés mécaniques des briques et des joints (Hilsdorf 1969). Nous avons choisi de modéliser séparément les parpaings et les joints comme des éléments de volume ayant un comportement mécanique élastoplastique, de façon à pouvoir identifier précisément la position des zones les plus sollicitées

dans la structure tridimensionnelle de la maison. Ce choix donne plus de précision sur la distribution des contraintes dans la maçonnerie, mais nécessite un grand nombre d'éléments. Les joints, qui ont une épaisseur faible par rapport aux parpaings, sont souvent assimilés à des interfaces dont la caractérisation mécanique se réduit à la description du frottement entre deux parpaings, en utilisant la loi de frottement de Coulomb (Subash et al 1996). Sinon, ils sont considérés comme des volumes déformables (c'est le cas dans notre étude). Lorsque cette approche est adoptée, il est nécessaire de déterminer expérimentalement les caractéristiques mécaniques des constituants, pour les prendre en compte dans le modèle de calcul. Abdou et al. (2008) sont partis d'essais de cisaillement effectués sur des assemblages briques/mortier pour développer un modèle d'interface pour les joints. Ils ont aussi développé un modèle élastoplastique avec endommagement pour décrire le comportement des briques. Ces modèles sont implantés dans le code de calcul en éléments finis CAST3M. Pour distinguer la rupture en traction de la rupture en compression, ils ont développé un critère à plusieurs surfaces : la traction est prise en compte en considérant deux critères de Rankine, tandis qu'un critère de Hill est utilisé en compression. Les caractéristiques mécaniques nécessaires dans le cas des briques sont le module d'Young, le coefficient de Poisson, les résistances en traction et compression et l'énergie de fissuration. Pour les joints soumis à une traction, on utilise les rigidités normales et tangente, l'énergie de fissuration et la résistance à la traction. Pour les joints soumis à un cisaillement, on utilise la cohésion, l'angle de frottement et l'énergie de cohésion. Fouchal et al. (2007) ont utilisé un modèle d'adhésion pour modéliser l'interface entre les briques et les mortiers, qui permet de coupler les conditions de contact unilatéral, de frottement et d'adhérence entre deux solides déformables. Ce modèle est implanté dans le code de calcul LMGC90. Les caractéristiques mécaniques d'interface sont représentées par les raideurs normales et tangente, l'énergie de cohésion, le coefficient de frottement et la viscosité. Nous avons choisi de considérer les parpaings et les joints comme des matériaux à comportement non linéaire (élastique linéaire – plastique). Leurs caractéristiques mécaniques sont le module d'Young, le coefficient de Poisson et les résistances en compression et en traction. Nous avons utilisé pour le calcul le module MCNL du code de calcul en éléments finis CESAR-LCPC, qui résout les problèmes de comportement mécanique non linéaire. Pour cette modélisation, nous avons considéré les conditions réelles des essais réalisés sur la maison expérimentale : même géométrie, mêmes conditions aux limites et chargement identique à l'expérience. Pour ce qui concerne les caractéristiques mécaniques des matériaux, faute de disposer de mesures sur les matériaux de la maison, nous avons utilisé des caractéristiques de matériaux qui ressemblent (parpaings et joints), trouvées dans la littérature (Hendry 2001, Gabor 2002 Lemaître 1988).

3 CONCEPTION DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

La maison expérimentale a été conçue pour permettre la répétition des essais et la comparaison des comportements de la structure avec et sans plancher. Un plan rectangulaire de 10,65m x 8,65m de dimensions extérieures (Figure 1), divisé en quatre secteurs supposés indépendants les uns des autres (Figure 2), a été adopté. Les murs extérieurs comportent des baies (portes-fenêtres) et des fenêtres. Seul le gros œuvre de la maison a été exécuté. Les charges correspondant à la toiture ont été remplacées par des massifs de béton répartis sur les murs pignons et de façade. La maison est divisée en quatre secteurs, qui permettent de tester deux fois chaque modalité structurelle. La maison repose par l'intermédiaire de sa semelle sur une série de supports mécaniques amovibles, fixés sur un support rigide en béton armé scellé en place. L'ensemble repose sur une plateforme en grave non traitée peu déformable. Pour la réalisation des essais dans un secteur de la maison, on vient remplacer les appuis mécaniques de ce secteur par des vérins

hydrauliques et produire les tassements ou soulèvements de la semelle de la maison à l'aide de ces vérins hydrauliques.



Figure 1. Vue d'ensemble de la maison expérimentale (MISS)

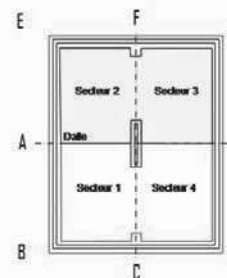


Figure 2. Secteurs d'essai.

3.1 Détails de la construction

La construction comporte un support général lié au terrain, des appuis métalliques portant la semelle de fondation des murs et la maison proprement dite. La fondation du dispositif expérimental est constituée d'une semelle rigide en béton armé coffré et scellé en place sur une plateforme peu déformable comportant une couche de 1 m d'épaisseur en grave B4 0/40 mm surmontée d'une couche de 20 cm de grave non traitée bien graduée D2 0/31,5 mm. Les appuis mécaniques servant de support à la construction ont été conçus et fabriqués spécialement pour cette opération. Pour placer un appui tous les 50 cm, 85 appuis mécaniques sont nécessaires. La capacité nominale de chaque appui est de 80 kN. Des vérins hydrauliques sont installés à la place des appuis mécaniques quand on veut imposer des déformations à la semelle de fondation de la maison. Les fondations sont des semelles plates de section 45 cm x 20 cm. L'armature utilisée est 3 HA8, le béton est dosé à 350 kg de CPJ 32.5 par mètre cube de béton, avec un enrobage de 4 cm. Une semelle isolée de 3 m de longueur est disposée au centre pour supporter le mur de refend de la maison expérimentale. Les murs de soubassement sont composés de 3 rangs de blocs de béton creux. Ils sont situés sous les murs périphériques et de refend. Les parpaings utilisés pour cette partie possèdent une résistance à la compression plus importante que les parpaings des murs. Des chaînages verticaux ont été réalisés aux angles de la maison et au milieu de chaque façade. Les chaînages horizontaux sont réalisés en couronnement des murs et au niveau de chaque plancher. Seule la moitié de la surface du plancher a été réalisée. Ce plancher est constitué de poutrelles et hourdis béton avec dalle de compression armée. L'autre moitié de la maison (sans dalle) simule le cas du dallage sur terre-plein. Les murs ont été réalisés en blocs de béton creux. La hauteur sous plafond de la construction est de l'ordre de 2,60 m. Il est prévu un mur de refend, à la fois pour supporter le plancher haut, et pour le contreventement de la structure. L'épaisseur des murs périphériques est de 20 cm et celle du mur de refend de 15 cm. Les murs ne comportent pas de revêtement ou d'enduit de façade. Il est à noter que les joints de mortier entre parpaings ont été réalisés. Des baies (2 x 2,15 m) et fenêtres (1,2 x 1,35 m) sont réalisées de façon identique sur les quatre secteurs de la construction. Il n'y a pas de menuiserie associée à ces ouvertures. Les linteaux placés au dessus des ouvertures ont

été coffrés et coulés en place, avec quatre armatures HA10 chacun. Le plancher haut est destiné à supporter les surcharges simulant la présence d'une charpente et d'une couverture. Il est constitué de bastinges posés à champ et de dalles de plancher en bois. Il est lesté à 7,5 t sur la façade et 2,85 t sur le mur pignon, avant la réalisation des essais.

3.2 Protocole d'essai

L'essai consiste à abaisser progressivement les vérins sous une partie de la semelle de fondation, en observant le comportement de la structure de la maison. Cette opération est prévue secteur par secteur, l'essai sur un secteur pouvant être répété si nécessaire sur le secteur symétrique. Pour le secteur choisi pour l'essai, la procédure expérimentale commence par la substitution des appuis mécaniques de la maison par des vérins. On abaisse ensuite les vérins en suivant une courbe de tassement parabolique (tassement maximal du côté extérieur). Les vérins sont d'abord abaissés pour les deux premiers appuis à partir du coin de la construction. Cette action a pour effet de permettre un tassement de la semelle de fondation de la maison. L'opération se poursuit en autorisant progressivement un tassement différentiel parabolique sur toute la longueur des semelles. Les valeurs caractéristiques retenues sont 1/1000ème, 1/500ème et 1/250ème. Les tassements autorisés sont imposés tous les mètres, ce qui est la distance entre deux vérins hydrauliques. Le temps d'observation et de suivi entre deux phases est en général de 24 heures. Le critère d'arrêt retenu est l'apparition de fissures dans les murs d'au moins 2 mm de largeur.

4 MODÈLE NUMÉRIQUE

Nous avons choisi une représentation tridimensionnelle de la structure de la maison, dans laquelle les parpaings, les joints et le béton sont modélisés par des éléments volumiques à huit nœuds, tandis que les chaînages horizontaux et verticaux sont représentés par des éléments linéiques superposés au maillage tridimensionnel. Comme déjà indiqué, chaque élément de volume est caractérisé par cinq paramètres : la masse volumique, le module d'Young, le coefficient de Poisson, la résistance en compression et la résistance en traction. La figure 3 présente les deux maillages de la maison : le maillage des éléments de volume à huit nœuds, qui représentent le béton des fondations, les parpaings et les joints et le maillage des éléments linéiques, qui représentent les armatures présentes dans les chaînages. Le maillage comporte 111643 éléments, qui se divisent en : 108194 éléments à 8 nœuds (24698 pour les parpaings, 31552 pour les joints, 51944 pour les poutres en béton et le plancher), 3449 éléments linéiques à 2 nœuds pour les armatures. Les propriétés des trois types de matériaux des éléments de volume sont données dans le tableau 1. Les propriétés des éléments linéiques des armatures sont données dans le tableau 2. Trois calculs, avec trois séries de conditions aux limites, ont été effectués, pour reproduire les conditions des trois essais décrits dans la première partie de cet article : suppression des appuis sous le secteur 1, suppression des appuis sous les secteurs 1 et 4, suppression des appuis sous le secteur 2.

4.1 Modélisation de l'essai sur le secteur 1

L'essai sur le secteur 1 consiste à abaisser les vérins hydrauliques qui portent la semelle de fondation sous le coin de la maison sans plancher. Pour le calcul, cette condition équivaut à l'absence d'appui sous cette partie de la semelle. Cet état, imposé par étapes dans l'étude expérimentale, mais sans que cela provoque de désordres dans la structure de la maison, a été imposé directement dans le calcul. On observe un enfoncement de la partie de la maison privée d'appuis et des mouvements latéraux du haut des murs de façade. La valeur calculée du déplacement vertical maximal (sous l'angle de la maison) vaut 3,4 mm, ce qui est proche de la valeur observée (3,2 mm). La

figure 4 compare les tassements calculés et observés sous les semelles de fondations.

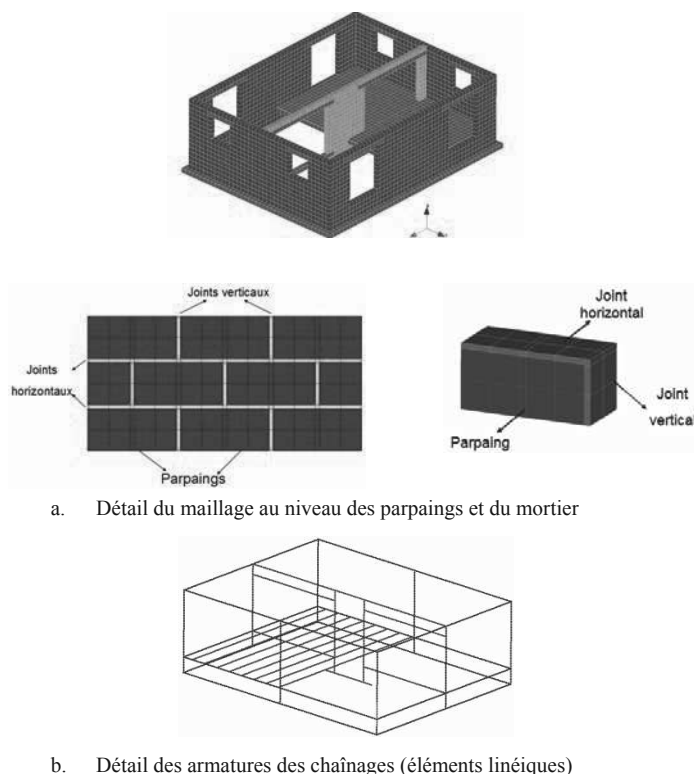


Figure 3. Maillages de la maison.

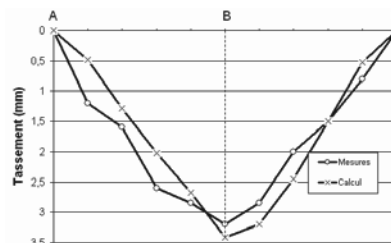
Tableau 1. Propriétés mécaniques des matériaux pour le calcul

	Masse volumique (kg/m ³)	Module d'Young (MPa)	Coefficient de Poisson (-)	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction (MPa)
Béton	2500	40000	0,2	20	2
Joints	1500	6000	0,2	6	1
Parpaings	1000	4000	0,1	4	0,5

Tableau 2. Propriétés mécaniques des armatures pour le calcul

	Masse volumique (kg/m ³)	Module d'Young (MPa)	Coefficient de Poisson (-)	Aire de la section droite (mm ²)
Armatures	7850	210000	0,3	157

Les aires de la section droite de l'armature des fondations (151 mm²) et de l'armature des chaînages verticaux et horizontaux (157 mm²) sont très proches. Une valeur unique a été choisie pour les deux.



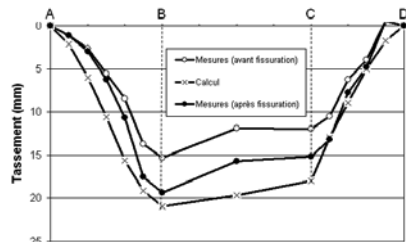
c. Figure 4. Essai sur le secteur 1 – Tassement de la semelle (mm)

La résistance en compression des éléments de maçonnerie est plus importante que leur résistance à la traction, qui est parfois négligée. Nous avons examiné les contraintes de traction produites dans les éléments en maçonnerie (éléments volumiques) et les efforts normaux dans les éléments linéiques et les avons comparés à la résistance à la traction introduite dans le calcul pour déterminer les zones où des désordres peuvent apparaître, comme des fissures. Ces contraintes dépassent la

résistance à la traction du béton (2 MPa) dans certaines zones de béton armé (semelles) d'extension limitée, où elles atteignent 3,41 MPa. Les valeurs maximales sont de 1,28 MPa dans les joints (pour une résistance à la traction de 1 MPa) et 43 MPa dans les armatures (effort normal de traction / aire de la section droite), ce qui reste en dessous des résistances à la traction des armatures. Les déformations du béton armé sont contenues par l'élasticité des zones contiguës, de sorte que l'on ne peut voir apparaître aucun désordre ni fissure dans la semelle, ce qui est compatible avec le résultat de l'étude expérimentale. Il faut noter que la valeur du moment fléchissant dans les éléments linéiques est de l'ordre de 5 N.m. Cette valeur faible ne dépasse pas la résistance des éléments.

4.2 Modélisation de l'essai sur le secteur 1 et 4

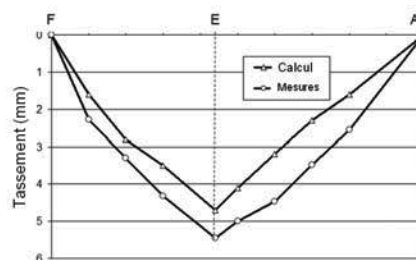
L'essai sur les secteurs 1 et 4 consiste à abaisser les vérins hydrauliques sous la moitié de la maison (côté sans plancher). Pour le calcul, cette condition équivaut à l'absence d'appuis sous cette partie de la semelle. Cette configuration a été appliquée directement dans le calcul, alors que l'essai comportait plusieurs phases. La figure 5 compare les tassements calculés et mesurés des semelles. Les tassements calculés et observés ont des valeurs proches. Le calcul a été effectué en suivant les phases de l'expérimentation, dans laquelle on a déchargé d'abord le secteur 1, puis on a replacé des supports sous ses fondations mais sans les ramener à la position initiale (le tassement de quelques millimètres a été conservé). Pour le calcul des secteurs 1 et 4, nous avons gardé comme état initial de déformation et de contraintes l'état final du calcul précédent (secteur 1). Ceci explique pourquoi les tassements calculés des secteurs 1 et 4 ne sont pas symétriques, alors que le maillage et les matériaux le sont.



d. Figure 5. Essai sur les secteurs 1 et 4 – Tassements de la semelle (mm)

4.3 Modélisation de l'essai sur le secteur 2

L'essai sur le secteur 2 consiste à autoriser un déplacement de la semelle de fondation sous un quart de la maison du côté du plancher, et à bloquer les déplacements calculés pour le chargement des secteurs 1 et 4 (créer des appuis avec des déplacements initiaux, car la maison n'a pas été ramenée à son état initial avant de réaliser l'essai sur le secteur 2), tout en tenant compte des contraintes produites dans la structure après le chargement des secteurs 1 et 4 comme état initial de calcul pour le secteur 2. La figure 6 compare les tassements calculés et mesurés. Le tassement maximal calculé vaut 4,8 mm, alors que la mesure a donné 5,6 mm. On observe que les murs du secteur 2 sont sensiblement moins sollicités que ceux du secteur 1 et 4. Les efforts normaux de traction dans les chaînages des secteurs 1 et 4 augmentent. Par contre, les efforts normaux de traction dans le secteur 2 sont faibles.



e. Figure 6. Essai sur le secteur 2 – tassement de la semelle.

5 CONCLUSION

La modélisation tridimensionnelle en éléments finis de la maison expérimentale testée au CER de Rouen a été effectuée en suivant une démarche naturaliste. Nous avons reproduit et décrit la géométrie et les propriétés mécaniques de chacun des matériaux utilisés pour la construction d'une maison courante. La modélisation de la suppression des supports des fondations sous un ou deux secteurs de la maison a produit des résultats encourageants en termes de tassements et de déformations de la structure en maçonnerie de cette construction. Les amplitudes des déformations dépendent des modules attribués aux matériaux, pour l'essentiel les parpaings, le mortier et le béton des semelles de fondation. Les conclusions opérationnelles que l'on peut tirer de cette étude ne sont pas issues du seul calcul : la plus importante est que la construction de maisons conformes aux règles françaises actuelles (DTU) semble suffisante pour leur donner une bonne résistance aux mouvements de retrait des sols dus à la sécheresse. Le calcul confirme cette bonne tenue d'une structure en maçonnerie avec des semelles de fondation en béton armé et des chaînages verticaux et horizontaux régulièrement espacés.

6 RÉFÉRENCES

- Fouchal F. 2006. *Contribution à la modélisation numérique des interfaces dans les structures maçonnées*. Thèse de doctorat de l'université de Reims-Champagne-Ardenne, Reims, 196p.
- Fouchal F., Pelissou C., Lebon F., Titeux I. 2007. *Modèle d'interface endommageable pour les maçonneries*. 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, pp.1-6.
- Hendry E.A.W. 2001. *Masonry walls: materials and construction*. *Construction and Building Materials*, 15, pp. 323-330.
- Gabor A. 2002. *Contribution à la caractérisation et à la modélisation des maçonneries non-renforcées et renforcées par matériaux composites*. Thèse de génie civil, Université Claude Bernard Lyon 1.
- Hilsdorf H.K. 1969. Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression, in : *Designing, engineering and constructing with masonry products*, eds. F.H. Johnson, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, USA, pp.34-41.
- Lemaître J., Chaboche J.L. 1988 *Mécanique des matériaux solides*. Dunod, Paris, 2^{ème} édition.
- Subash C.A., Kishore K.Y. 1996. Three-dimensional failure analyses of composite masonry walls. *International Journal of Structural Engineering*, Volume 122, pp. 1031-1039.