

Etude des conditions hygrothermiques sur la fissuration d'une paroi en brique de terre crue, bois et mortier minéral.

L. LAOU^{1,2*}, L. ULMET¹, S. YOTTE¹, M. TAKARLI¹, P. MAILLARD³, S. ROSSIGNOL².

¹ Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes – Equipe Génie Civil et Durabilité. Université de Limoges, Boulevard Jacques Derche, 19300 Egletons, France, mail : lamyaa.laou@etu.unilim.fr, laurent.ulmet@unilim.fr, sylvie.yotte@unilim.fr, mokhfi.takarli@unilim.fr.

² Sciences des Procédés Céramiques et de Traitements de Surface (SPCTS), Ecole Nationale Supérieure de Céramique Industrielle, 12 Rue Atlantis, 87068 Limoges cedex, France, mail : lamyaa.laou@etu.unilim.fr, sylvie.rossignol@unilim.fr.

³ Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction, 1 avenue d'Ester, 87069 Limoges Cedex, France, mail : p.maillard@ctmnc.fr.

(*)Lamyaa.laou@etu.unilim.fr

RÉSUMÉ. La complexité des sollicitations climatiques rend difficile la prédiction du comportement mécanique des matériaux hygroscopiques et leur assemblage. Dans cette étude, le comportement mécanique d'une paroi composée de matériaux hygroscopiques et soumise à différentes sollicitations hygro-climatiques a été caractérisé dans une double enceinte climatique. Pour prévoir les mouvements hygrothermiques dans la paroi, un modèle couplé thermo-hygro-mécanique a été développé ; il permet d'évaluer les contraintes mécaniques générées par le retrait lors du séchage du mur de 80 % à 50 % d'humidité relative. La confrontation des résultats numériques et expérimentaux a montré une bonne adéquation. En effet, il a été constaté qu'un comportement différent entre le bois et la brique peut générer des efforts de cisaillement et de traction qui atteignent 3,8 MPa au niveau de l'interface et 2 MPa au centre de la brique. Cette étude a permis de montrer la capacité de l'outil numérique développé par éléments finis à prédire le comportement de la paroi sous les différentes sollicitations hygro-climatiques.

ABSTRACT. The complexity of climate solicitations makes difficult to predict the mechanical behavior of hygroscopic materials and their assemblage. In this study, the mechanical behavior of a wall composed of hygroscopic materials and subjected to various hygro-climatic solicitations has been characterized in a double climatic chamber. To forecast the hygrothermal movement in the wall, a thermo-hygro-mechanical coupled model was developed. It allows to evaluate the mechanical stresses generated by shrinkage during the drying of the wall from 80% to 50% of relative humidity. The comparison of numerical and experimental results showed a good adequacy. Indeed, it has been observed that a different behavior of the wood and mud-brick can generate shear and traction forces that reach 3.8 MPa at the interface and 2 MPa in the center of the brick. This study allowed to show the ability of the digital tool developed by finite elements to predict the behavior of the wall under different hygro-climatic stresses.

MOTS-CLÉS : Modèle couplé thermo-hygro-mécanique, mur, brique de terre crue, bois

KEY WORDS: Thermo-hygro-mechanical coupled model, wall, wood, mud-brick

1. Introduction

Le contexte relatif aux questions sur le climat impose de plus en plus la conception de systèmes constructifs à faible consommation d'énergie (Guillaud. H et al. 2006). L'utilisation de murs constitués d'éco-matériaux combinant le bois en tant qu'ossature et les briques en terre crue en tant que remplissage apparaît comme une solution alternative intéressante. Ce procédé est conforme aux objectifs en matière de développement durable notamment en raison des propriétés thermo-hydriques des composants et de la recyclabilité des matériaux (Allinson 2009). Les différents matériaux choisis peuvent alors conférer à l'assemblage une capacité à réguler de façon naturelle à la fois la température et l'humidité relative dans la construction (Fouchal et al. 2015). La problématique d'une telle construction est l'apparition de fissures ou de joints au niveau de l'interface (bois / brique) (Figure1). Ceci est dû à la faiblesse de l'adhérence naturelle de ces derniers et aux phénomènes de retrait / gonflement dont l'intensité fluctue en fonction de la température et de l'humidité. Parmi les voies de développement possibles et pour pallier ce problème, l'utilisation d'une mousse de type géopolymère en tant que matériau d'interface a été étudiée par Gouny (2013).

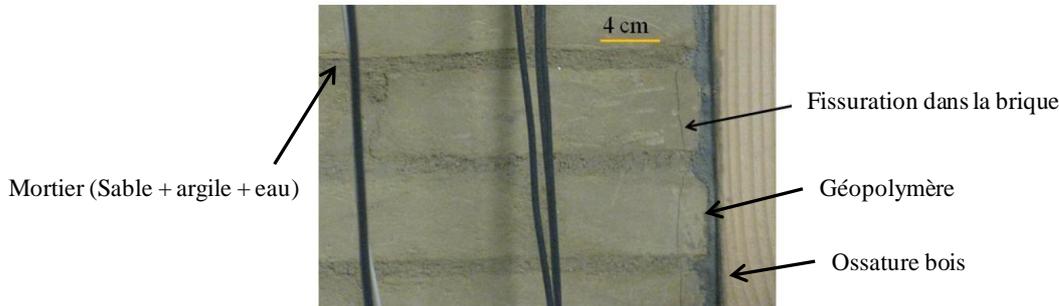


Figure 1 : Fissuration dans la brique lors du séchage du mur de 80 % à 50 % d'humidité relative.

Toutefois, une fissuration est également observée sur le mur et pourrait être expliquée par un retrait du bois et/ou de la brique lors du séchage du mur à 50 % HR. En effet, les comportements de retrait/gonflement différents de ces deux matériaux peuvent générer des efforts de cisaillement et de traction au niveau des interfaces.

Cette étude a pour but de développer un modèle couplé thermo-hygro-mécanique permettant de simuler l'effet de différents scénarios décrits en termes d'évolution dans le temps de l'humidité et de la température sur la fissuration. Les scénarios permettent alors d'identifier les conditions climatiques conduisant à la fissuration de la paroi. Afin d'alimenter le modèle numérique avec des données matériaux, une campagne expérimentale a été menée pour déterminer les propriétés intrinsèques de chaque matériau sous différentes atmosphères.

Ce document se décompose en trois parties. La première partie décrit le système étudié ainsi que les moyens expérimentaux et numériques mis en œuvre. La seconde partie regroupe l'ensemble des résultats expérimentaux permettant d'alimenter le modèle numérique. Dans une troisième partie, est rassemblé et discuté l'ensemble des résultats obtenus par le modèle.

2. Moyens expérimentaux et numériques mis en œuvre

2.1 Dispositif expérimental

Afin de valider la faisabilité et d'évaluer le comportement hygrothermique du système constructif, un mur à l'échelle réelle de dimension : $L \times H \times P = 2,4 \times 2,5 \times 0,11 \text{ m}^3$ a été construit dans le site du Centre Universitaire Génie Civil d'Egletons par Gouny. F (2013). Il est constitué de trois compartiments de briques délimités par des raidisseurs en bois. Ce mur est supporté par un cadre mobile et placé hermétiquement entre deux chambres climatiques dont la température et l'hygrométrie sont contrôlées (Figure 2.a). Il est instrumenté par cinq thermo-hygromètres capacitifs disposés à mi-hauteur (Figure 2.b). Ces derniers ont été intégrés dans les briques à différentes profondeurs afin de mesurer les gradients thermiques et hydriques durant les différents essais.

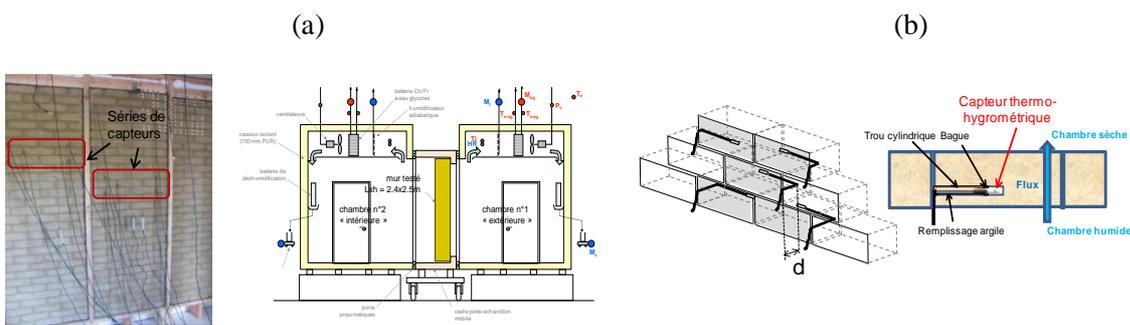


Figure 2 : (a) schéma de la double enceinte climatique et (b) position des capteurs dans l'épaisseur du mur

2.2 Démarche adoptée pour le développement du modèle numérique

La Figure 3 détaille la démarche adoptée pour le développement du modèle couplé thermo-hygro-mécanique. Le modèle hygrothermique permet de prédire le champ d'humidité dans la paroi et un modèle mécanique permet ensuite de déterminer les contraintes mécaniques générées par une loi de gonflement / retrait. La simulation du comportement thermo-hydrigue du mur nécessite une série d'essais expérimentaux pour quantifier les propriétés hygrothermiques des différents matériaux constitutifs du mur. Les variables d'entrée du modèle sont : T et HR, ainsi que les paramètres des lois de comportements déterminées expérimentalement (Teneur en eau, perméabilité à la vapeur d'eau, conductivité thermique, coefficient de retrait, module d'élasticité). Nous prendrons dans ces simulations une température constante égale à 23°C.

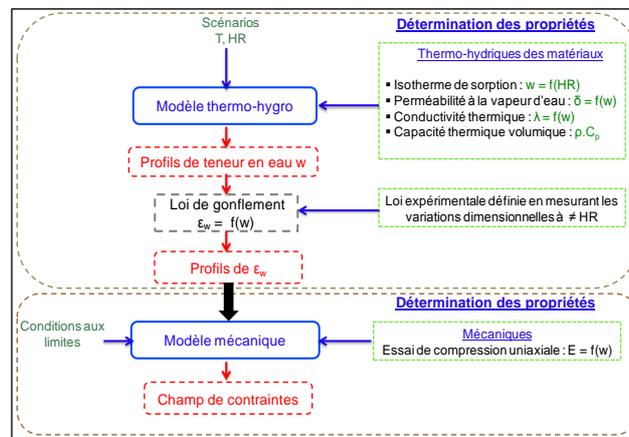


Figure 3 : Organigramme du développement couplé thermo-hygro-mécanique

2.3 Méthode de caractérisation des matériaux

Le tableau 1 résume les instruments de mesure utilisés pour déterminer les propriétés des matériaux

Tableau 1 : Méthode de caractérisation des matériaux

Lois de comportements expérimentales	Méthodes adoptées
Teneur en eau $w = f(HR)$	Isotherme de sorption (NF 12571)
Perméabilité à la vapeur d'eau $\delta = f(w)$	En exploitant les cinétiques de sorption
Conductivité thermique $\lambda = f(w)$	Hot disk
Coefficient de retrait $\alpha = f(HR)$	Capteurs laser
Module d'élasticité $E = f(w)$	Essai de compression : -Vitesse de déplacement de 0,5 mm/min -Mesure de la déformation avec une cellule extensométrique

En ce qui concerne la perméabilité à la vapeur d'eau de la brique il a été choisi de l'estimer en exploitant les cinétiques de sorption, par une méthode d'identification consistant à modéliser les paliers de sorption par éléments finis. L'identification paramétrique repose sur la minimisation des écarts avec la méthode simplexe entre les valeurs de teneur en eau moyennes théoriques et mesurées. Cette approche est assez originale puisqu'elle permet d'obtenir une loi continue de la perméabilité en fonction de la teneur en eau, contrairement aux tests classiques notamment à la coupelle, qui ne permet d'avoir que deux valeurs de perméabilité : une en état sec sur l'intervalle [0-50 %HR] et l'autre en état humide sur l'intervalle [50-100 %HR]. En théorie, deux valeurs moyennes de perméabilité pondérale ne suffisent pas à caractériser complètement le comportement hygrothermique du matériau.

3. Résultats expérimentaux

3.1 Isotherme de sorption

La Figure 4 illustre la variation de la teneur en eau d'équilibre en fonction de l'humidité relative de l'atmosphère entourant l'échantillon (bois / brique).

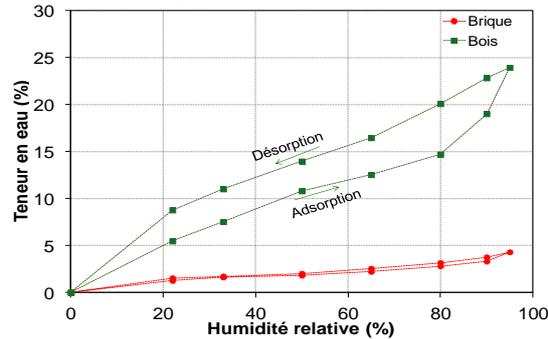


Figure 4 : Isothermes de sorption du bois et de la brique

La courbe de sorption de la brique est très en dessous de celle du bois, justifiant ainsi d'une capacité d'adsorption environ cinq fois plus faible sous l'effet des variations d'humidité relative. L'allure des courbes est en accord avec les données de la littérature (Cagnon H et al 2012). Les deux matériaux présentent une hystérésis entre la courbe d'adsorption et de désorption, ce phénomène étant plus marqué pour le bois que pour la brique. Nous choisissons de négliger le phénomène d'hystérésis de la brique. Ceci s'explique par la nature du réseau poreux constitué de pores dont la distribution de tailles est différente et par le fait qu'il est plus facile de fixer les molécules d'eau dans le réseau poreux plutôt que de les extraire (Samri D 2008).

3.2 Perméabilité à la vapeur d'eau

La Figure 5 représentant la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de la teneur en eau est construite par raccordement des différents faisceaux de segment. Ces derniers correspondent à la perméabilité calculée pour chaque palier de sorption. Les résultats obtenus montrent que la perméabilité augmente avec la teneur en eau. Cette augmentation devient plus importante pour une teneur en eau supérieure à 4%. Il convient d'être prudent sur l'utilisation de ces valeurs dans ces domaines proches de la saturation, car le mode de transfert sous forme liquide devient alors prédominant. Pour valider cette méthode d'identification, une étude multi-échelle a été réalisée sur différentes tailles d'échantillons et il a été constaté qu'il n'y a pas d'effet d'échelle ni de sens de sorption (adsorption-désorption) (Medjelekh D 2015). Il a été choisi d'alimenter le modèle par une loi empirique sous forme exponentielle.

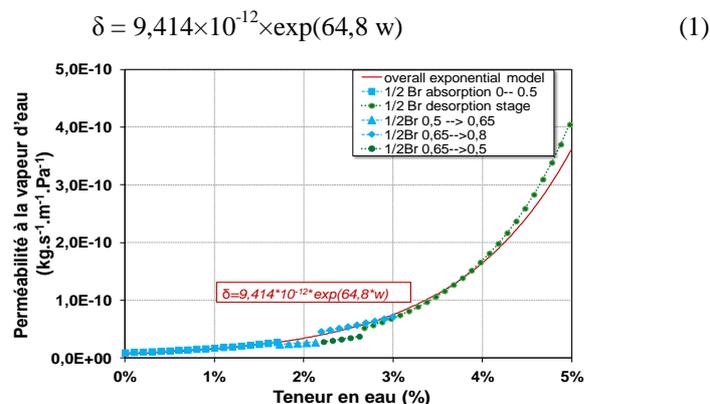


Figure 5 : Perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de la teneur en eau pour la brique

3.3 Conductivité thermique

La figure 6 rapporte les valeurs de la conductivité thermique mesurée en fonction de la teneur en eau dans les deux sens de la brique : sens de pose et sens du mur. La conductivité thermique est une fonction croissante de l'état hydrique du matériau. La loi de comportement qui relie la conductivité thermique à la teneur en eau choisie pour alimenter le modèle sera par la suite raffinée et corrigée par des essais qui seront réalisés à des teneurs en eau plus élevées. Au vu de ces évolutions, l'hypothèse émise dans la suite de cette étude est que la brique présente un comportement thermique isotrope qui peut être décrit par l'équation suivante.

$$\lambda = 0,366 w + 0,341 \text{ [W. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (2)$$

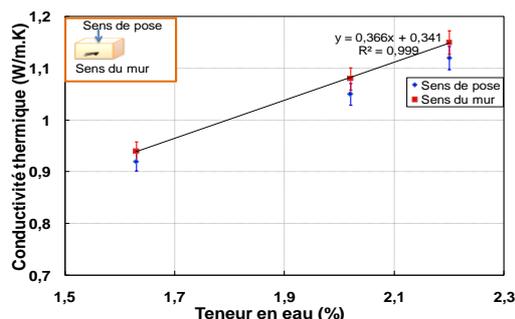


Figure 6 : Mesure de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau

3.4 Retrait/gonflement

La figure 7(a et b) représente respectivement la variation de la déformation en fonction du temps à différents paliers d'humidité relative (55, 75 et 85 %) et le coefficient de gonflement en fonction de la teneur en eau. Le coefficient de gonflement noté α est calculé par le rapport de la différence de déformation libre sur la différence de teneur en eau entre deux paliers d'humidité : $\alpha = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta w}$.

Les courbes ont une allure (Figure 7.a) identique et montrent que la majeure partie des déformations se produit pour des fortes humidités relatives avec des amplitudes de déformation variables suivant les différentes directions. En effet, lorsque la brique se charge en humidité, elle se dilate sous l'effet du relâchement des tensions capillaires. Le même comportement est observé pour le coefficient de gonflement en fonction de la teneur en eau (Figure 7.b). Ces mesures mettent en évidence que la brique est anisotrope et que la direction d'anisotropie est la direction de l'extrusion. Le modèle est alimenté par deux valeurs constantes de coefficient de gonflement : $\alpha_1 = 0,109$ et $\alpha_2 = 0,075$. Ce sont les moyennes des valeurs pour une humidité relative comprise entre 85% et 55%.

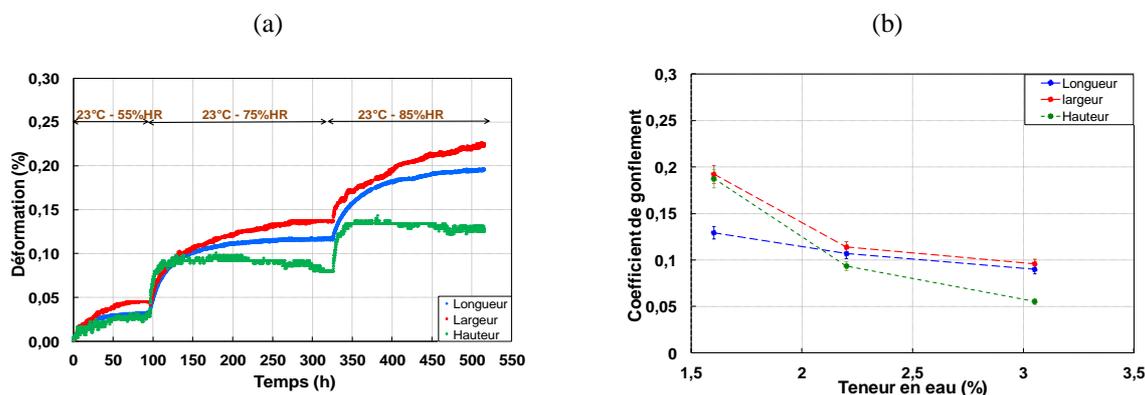


Figure 7 : (a) Variation de déformation en fonction de l'humidité relative et (b) coefficient de gonflement en fonction de la teneur en eau pour la brique

3.5 Essais mécaniques

La figure 8 (a.b) représente respectivement les courbes contrainte à rupture et déformation à rupture ainsi que le module d'élasticité en fonction de l'hygrométrie du matériau. Les courbes (figure 8.a) mettent en évidence une

diminution de la contrainte de 35 % et de déformation de 50% par rapport aux valeurs initiales lorsque la teneur en eau varie de 1,6 % à 2,3 %. Cette variation s'explique par la diminution de la succion et donc de la modification de l'intensité des interactions entre les plaquettes argileuses quand la teneur en eau augmente. La figure (8.b) représentant le module d'élasticité en fonction de la teneur en eau montre le même comportement. Il est à noter une diminution nette du module d'élasticité en fonction de la teneur en eau. Ceci s'explique aussi par le traitement hydrique qui engendre une perturbation de l'empilement granulaire. Pour de raisons de simplicité, le module d'Young utilisé est la moyenne des valeurs de 2,1 % à 2,3 %, puisque la simulation correspond à la gamme de teneur en eau de cet ordre.

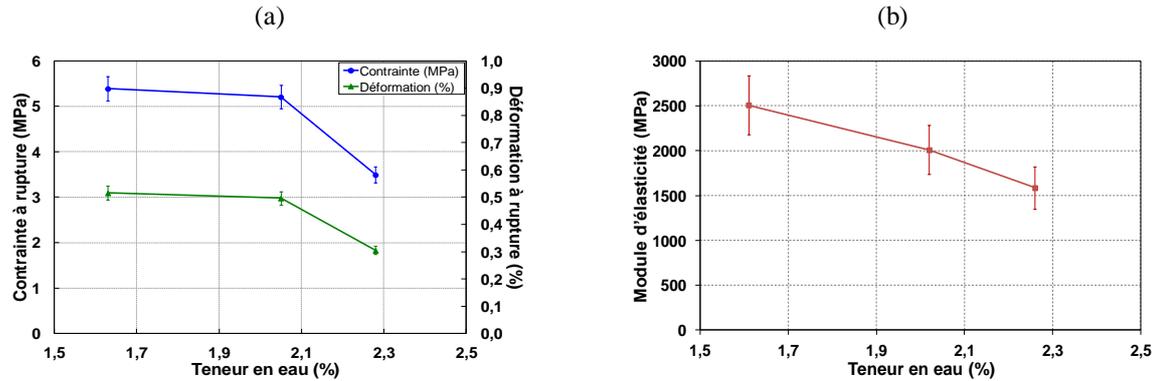


Figure 8 : (a) Contrainte / déformation au pic et (b) module d'élasticité en fonction de la teneur en eau pour la brique

- **En conclusion, on supposera :**
- Un comportement isotrope pour la brique. En effet, les essais réalisés par l'ultrason montrent une différence négligeable de modules d'élasticité suivant les différentes directions. En revanche, l'anisotropie de la déformation hydrique est prise en compte dans le modèle numérique.
- Un comportement orthotrope pour le bois. Les propriétés du bois 'Douglas' insérées dans le modèle sont puisées de la littérature (TROUY-TRIBOULOT. M 2012)
- Les lois utilisées pour alimenter le modèle dans le cas de la brique :
 - Conductivité thermique : Loi linéaire $\lambda = 0,366 w + 0,341$
 - Coefficient de retrait : $\alpha_1 = 0,109$ et $\alpha_2 = 0,075$
 - Perméabilité à la vapeur d'eau : Loi exponentielle $\delta = 9,414 \times 10^{-12} \times \exp(64,8 w)$
 - Module d'élasticité : $E = 1700$ MPa

4. Résultats numériques

Le cas étudié porte sur la phase de séchage du mur dans une ambiance (23°C, 50 % HR) sur ses deux faces, à partir d'une situation initiale pour laquelle le mur était à une humidité relative de l'ordre de 80%.

4.1 Etude unidimensionnelle en partie courante de la maçonnerie

Le maillage utilisé est constitué d'un empilement unidimensionnel d'éléments tétraédriques dans l'épaisseur du mur (Figure 9.a). Le modèle permet de calculer les profils numériques de l'humidité relative dans le matériau à différents temps de séchage. Ceux-ci sont en très bonne adéquation avec les mesures, comme le montre la figure 9.b.

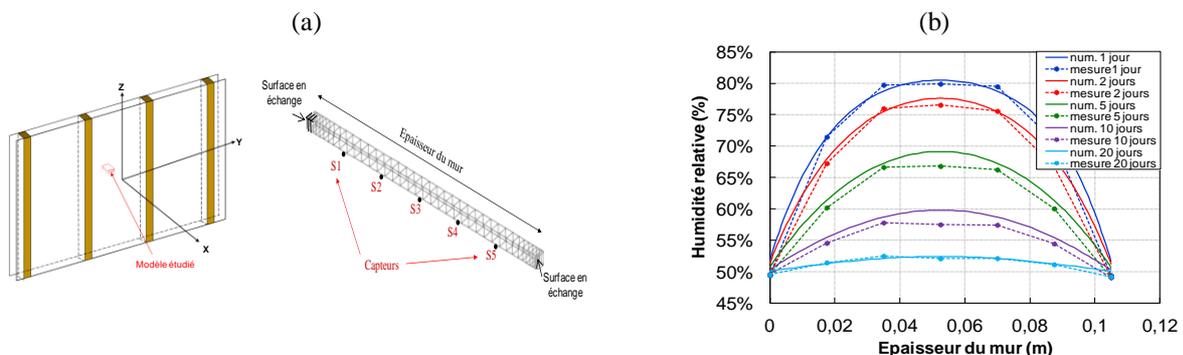


Figure 9 : (a) Modèle éléments finis et position des capteurs et (b) profil d'humidité relative numérique et mesuré à l'aide des sondes dans l'épaisseur du mur à différents temps de séchage.

La figure 10.a représente la variation de teneur en eau dans l'épaisseur du mur à différentes dates. L'amplitude maximale de variation augmente dans l'épaisseur du mur en fonction de l'avancée du séchage (figure 10.a), générant des déformations libres de retrait hydrique qui peuvent être visualisées sur la figure 10.b sur ce modèle simpliste unidimensionnel. Si ce retrait est contrarié par des conditions aux limites telles qu'un blocage des déplacements dans le plan du mur par exemple, ceci peut conduire à l'apparition de contraintes de traction dans le mur allant à 3MPa (figure 10.c).

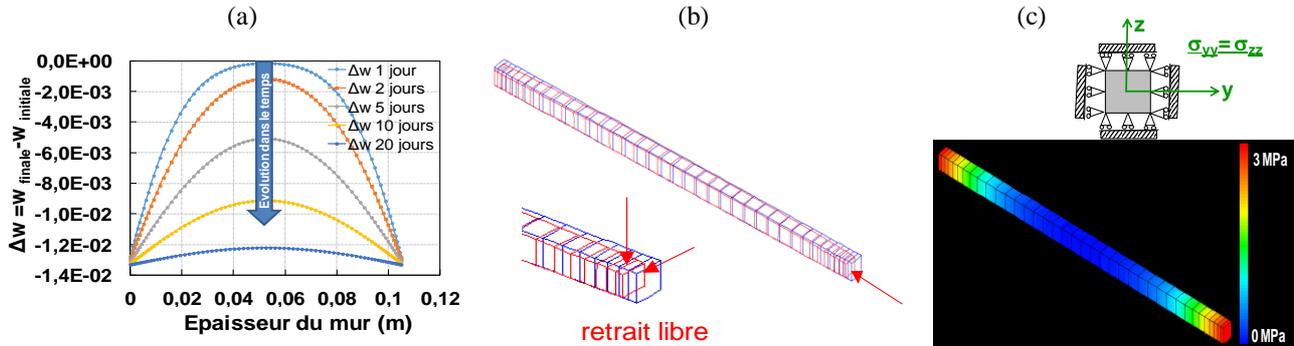


Figure 10 : (a) Variation de teneur en eau et (b) retrait libre au centre de la maçonnerie dû au champ hydrique et (c) blocages mécaniques et contraintes en résultant.

4.2 Etude bidimensionnelle de l'assemblage bois/brique

Afin d'étudier le comportement hygro-mécanique de l'assemblage bois/brique, un modèle bidimensionnel est établi, représentant un module de cette structure répétitive, délimité par deux plans de symétrie. La figure 11 représente l'évolution de l'humidité relative dans le domaine à différents temps de séchage.

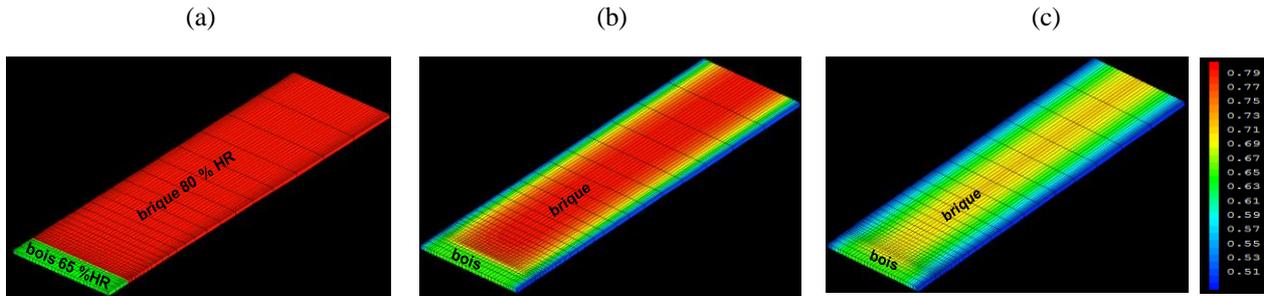


Figure 11 : Evolution de l'humidité relative de l'assemblage bois/brique (a) au moment de la construction du mur; (b) après 1 jour de séchage et (c) après 5 jours de séchage

Les hygrométries de la brique et du bois mesurées lors de la construction du mur sont respectivement de 80% et 65 % (Figure 11.a). Il a été supposé que la liaison entre le bois et la brique était parfaite et qu'il n'y avait pas de résistance de transfert d'humidité entre les deux matériaux d'où la continuité de l'humidité relative entre ces derniers (Figure 11.c). Il s'avère que les mécanismes de transfert hydriques sont beaucoup plus rapides dans la brique que dans le bois en relation avec la teneur en eau diffusionnelle.

La figure 12 (d, e et f) représente les cartographies des champs de contraintes générées par le champ hydrique de l'assemblage bois/brique suivant les différentes directions (Figure 12(a, b et c) interface bois/brique; Figure 12(g,h) brique). Le retrait hydrique provoque des contraintes de traction dont la composante maximale dans le repère général est σ_{yy} (figure 12.a). Au niveau de l'interface, la contrainte atteint 3,8 MPa sur les bords. Au centre de la maçonnerie, la contrainte atteint 2 MPa près de la surface du mur dès les premiers jours, puis s'uniformise progressivement à cette valeur dans toute l'épaisseur au cours du temps. La cartographie des contraintes σ_{xy} (Figure 12.f) montre un plan de cisaillement le long de l'interface, pouvant atteindre 2 MPa à proximité de la surface du mur. Ceci est dû au retrait différentiel de la brique et du bois. L'identification d'un critère de rupture permettra d'identifier la zone potentiellement fissurée.

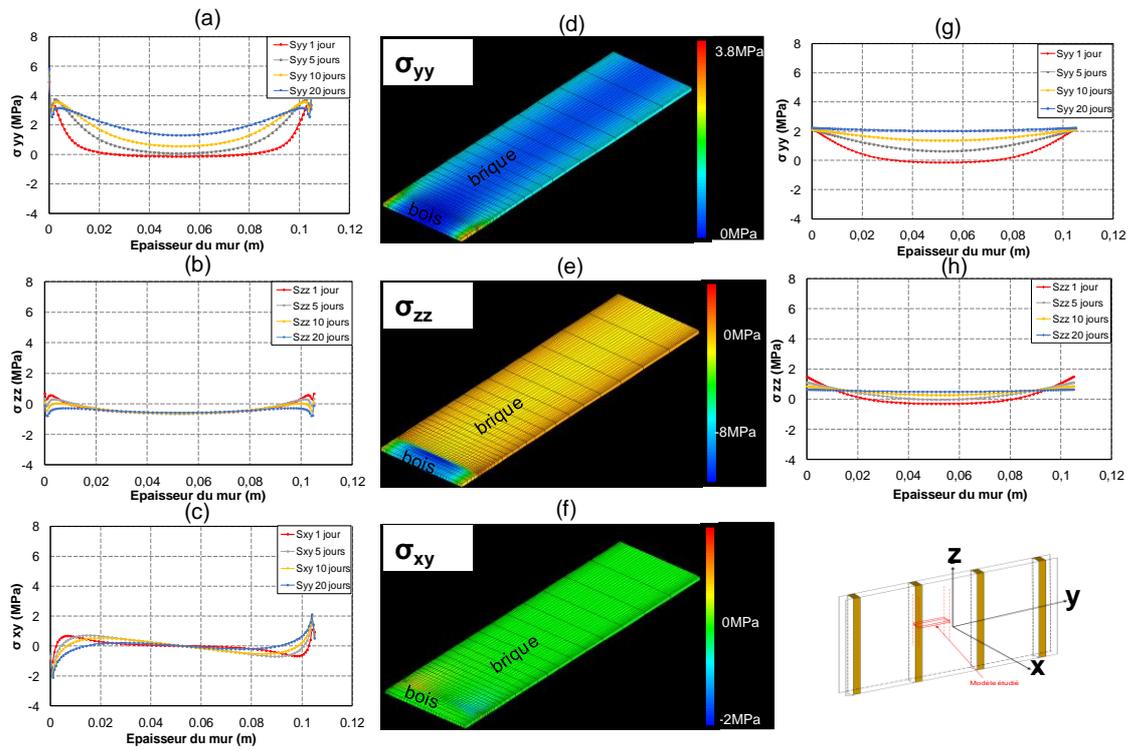


Figure 12 : Profils de champ de contrainte de l'assemblage bois/brique suivant les différentes directions

5. Conclusion

Ce travail a permis via des approches expérimentales et numériques d'étudier, d'une part l'effet du champ d'humidité et de température sur le comportement global (retrait/gonflement) de la paroi et d'autre part les contraintes générées par le champ hydrique. Les résultats expérimentaux ont mis en évidence que les matériaux choisis ont une bonne aptitude d'échange hygrométrique entre l'intérieur et l'extérieur d'une construction et possèdent des qualités thermiques qui les feront réagir d'une façon satisfaisante aux différentes sollicitations. En revanche, il a été constaté un caractère plus au moins sensible (retrait et gonflement) des briques en terre crue en fonction des sollicitations hygrothermiques. Ceci a été confirmé par les essais expérimentaux et les résultats obtenus par le modèle numérique. En effet, lors du séchage du mur de 80 % à 50 % HR, il a été remarqué une variation volumétrique accompagnée de contraintes (traction / compression) de 3,8 MPa au voisinage de l'interface et de 2 MPa au niveau de la brique. Il est à noter que ces contraintes sont générées par l'hypothèse d'un collage parfait entre le bois et la brique. Si on ne tenait pas en compte de cette hypothèse, la contrainte de traction sera différente.

D'autres pistes de recherche sont envisageables afin d'enrichir le modèle numérique par des lois de comportement plus proche de la réalité comme $E = f(w)$, $\alpha = f(HR)$ et la perméabilité en phase liquide pour déterminer plus précisément les conditions climatiques conduisant à la fissuration de la paroi. Il serait aussi intéressant de prendre en considération les propriétés des différents éléments constitutifs du mur, notamment le géopolymère et le mortier de terre dans la simulation du mur afin de simuler et localiser la fissuration dans le mur. Pour la suite des travaux, il va être nécessaire de réaliser des essais mécaniques à la rupture sous différentes atmosphères afin de définir un critère de rupture, étant donné le caractère multidirectionnel du champ de contraintes.

6. Bibliographie

- [GUI 06] GUILLAUT H., HOUBEN H., «Traité de construction en terre» Parenthèses, 2006.
 [ALL 09] ALLINSON D., HALL M., «Hygrothermal analysis of a stabilized rammed earth test building in the UK», *Energy and building*, Vol 42, 2009, p. 845-852.

[FOU 15] FOUCAL F., GOUNY F., MAILLARD P., ULMET L., ROSSIGNOL S., «Experimental evaluation of hydric performances of masonry walls made of earth bricks, geopolymer and wooden frame», *Construction and building Materials*, Vol 87, 2015, p. 234-243.

[GOU 13] GOUNY F., «Nouveau système constructif multimatériaux bois / liant / géopolymère / brique de terre crue: formulation, caractérisation et transfert d'échelle», Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2013.

[CAG 12] CAGNON H., AUBERT JE., COUTAND M., «Propriétés hygrothermiques de briques de terre crue produites en Midi-Pyrénées», *Colloque International Francophone NoMaD LMDC / AUGC*, 2012.

[SAM 08] SAMRI D., «Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique », Institut national des sciences appliquées de Lyon, Thèse de doctorat, 2008.

[MED 15] MEDJELEKH D., «Caractérisation multi-échelle du comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques», Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2015.

[TRO 12] TROUY-TRIBOULOT M., TRIBOULOT P., «Matériaux bois-Structure et caractéristiques», *Techniques de l'ingénieur*, Réf C925, 2012.