

# Evaluation du comportement mécanique d'un mur en terre crue sous sollicitations thermo-hydriques lors de son utilisation

L. Laou<sup>1,2</sup>, L. Ulmet<sup>1</sup>, S. Yotte<sup>1</sup>, P. Maillard<sup>3</sup>, S. Rossignol<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité (GC2D), Université de Limoges, Boulevard Jacques Derche, 19300 Egletons, France, mail : [lamyaa.laou@unilim.fr](mailto:lamyaa.laou@unilim.fr), [laurent.ulmet@unilim.fr](mailto:laurent.ulmet@unilim.fr), [sylvie.yotte@unilim.fr](mailto:sylvie.yotte@unilim.fr).

<sup>2</sup> Sciences des Procédés Céramiques et de Traitements de Surface (SPCTS), ENSIL ENSCI, 12 Rue Atlantis, 87068 Limoges cedex, France, mail : [lamyaa.laou@unilim.fr](mailto:lamyaa.laou@unilim.fr), [sylvie.rossignol@unilim.fr](mailto:sylvie.rossignol@unilim.fr).

<sup>3</sup> Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction, 1 avenue d'Ester, 87069 Limoges Cedex, France, mail : [p.maillard@ctmnc.fr](mailto:p.maillard@ctmnc.fr).

[lamyaa.laou@unilim.fr](mailto:lamyaa.laou@unilim.fr)

---

**RÉSUMÉ.** La complexité des sollicitations climatiques rend difficile la prédiction du comportement mécanique des parois en terre crue. Le premier argument en faveur de ce type de paroi est sa capacité à compenser les fluctuations d'humidité dans l'air et à améliorer ainsi le climat intérieur. Cependant, la durabilité de ce type de matériaux et leur sensibilité à l'humidité freine grandement leurs utilisations dans des structures dimensionnées pour des durées de vie importante. Dans ces travaux d'étude, il a été développé un modèle couplé thermo-hygro-mécanique sous CAST3M permettant d'évaluer d'une part, la capacité de ce type de paroi à réguler l'ambiance intérieure, et estimer les gains sur le confort, et d'autre part, d'évaluer le risque d'apparition de désordres sous l'effet des sollicitations qui lui seront appliquées au quotidien. Dans ce sens, une étude comparative sur différentes configurations de cloisons (terre crue, légères en plâtre) sous des sollicitations climatiques annuelles proches de celle d'une maison individuelle de type T4 est réalisée. Les résultats obtenus montrent la capacité de stockage et de restitution d'humidité des systèmes constructifs en terre, avec un caractère plus au moins sensible aux variations climatiques. Il a été constaté que durant les journées présentant les plus basses humidités relatives (décembre), le champ hydrique génère des contraintes qui dépassent le critère de rupture.

**ABSTRACT.** The complexity of the climatic solicitations makes it difficult to predict the mechanical behaviour of the earth walls. The first advantage of this type of wall is its ability to compensate for humidity fluctuations in the air and thus improve the indoor climate. However, the durability of this type of material and its sensitivity to moisture greatly inhibits their use in structures designed for long lifetime. In this study, a coupled thermo-hygro-mechanical model under CAST3M has been developed which makes it possible to evaluate, firstly, the capacity of this type of wall to regulate the indoor environment, and to estimate the gains on comfort and secondly, determine the risk of occurrence of disorders under different solicitations. In this sense, a comparative study is carried out on different configurations of partitions (raw earth and light plaster) under annual climatic solicitations close to that of a single house type T4. The obtained results show the storage capacity and humidity restitution of constructive earth systems, with a character more or less sensitive to climatic variations. It has been found that during days with the lowest relative humidity (December), the moisture field generates stresses that exceed the failure criterion.

---

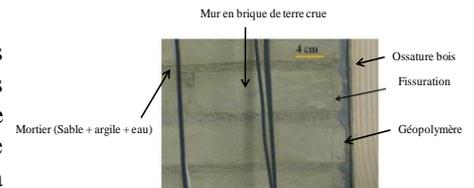
**MOTS-CLÉS :** briques de terre crue, comportement thermo-hydrique, mécanique, expérimentations, simulations numériques  
**KEY WORDS :** earth bricks, thermo-hydric behavior, mechanics, experiments, numerical simulations.

---

## 1. Contexte de l'étude

Dans ce travail de thèse, nous nous sommes intéressés au développement d'un système constructif répondant aux attentes des différents plans climat, en intégrant la consommation d'énergie et l'empreinte environnementale du bâti, durant toute sa durée de vie. La sélection des matériaux a permis selon une liste de critères à la fois scientifiques, géographiques et environnementaux de répondre à notre problématique en s'orientant vers l'intégration des matériaux biosourcés et géosourcés (la terre crue, le bois) pour leurs aspects favorables à l'environnement et à l'efficacité énergétique du bâtiment en raison de leur capacité de régulation naturelle des conditions hygrothermiques ambiantes. La maille élémentaire de ce système est constituée d'un cadre en bois dans lequel un remplissage à base de briques de terre crue a été disposé.

Ce système est constitué de trois compartiments de briques délimités par des raidisseurs en bois. Le bois de type douglas est utilisé pour fractionner les phénomènes de variations dimensionnelles ainsi que protéger les briques de terre crue des humidifications liées à l'usage. L'assemblage de ces briques entre elles a été assuré avec un mortier de terre. Par ailleurs, les problèmes de la faible adhérence du bois et de la brique de terre crue et du comportement différentiel lié au retrait et au gonflement ont été résolus par l'utilisation d'un matériau d'interface de type géopolymère.



**Figure 1.** fissuration dans la brique après séchage de 80 % à 50 % HR

Toutefois, des fissurations sont observées sur le mur et pourraient être expliquées à la fois par la formation d'une interphase avec la pénétration de la mousse géopolymère à travers la porosité de la brique, et par le retrait différentiel du bois et/ou de la brique au moment du séchage du mur suivant sa construction (

Figure 1).

## 2. Objectif de l'étude

Cette étude a pour but de développer un outil numérique couplé thermo-hygro-mécanique sous CAST3M avec une échelle appropriée pour prédire d'une part, la capacité de la paroi à réguler les conditions hygrothermiques ambiantes lors des alternances jour/nuit et d'autre part, identifier les différents scénarios décrits en termes de température et d'humidité pouvant induire l'apparition de fissures lorsque la paroi est en service.

## 3. Modèle numérique

### 3.1. Equations de couplage des différents transferts dans la paroi

Dans une paroi en matériau poreux, les mécanismes de diffusion peuvent s'effectuer selon trois modes : transfert de chaleur, transfert d'eau en phase liquide ou en phase vapeur. Les équations de couplage entre le transfert de chaleur et de masse, utilisées dans la simulation numérique du mur peuvent être résumées par les deux équations de bilans suivantes, exprimées sous une forme 3D générale. Elles sont bâties à partir des équations de transfert hygrothermique selon les principes fondamentaux de la thermodynamique.

$$\left(\overline{\rho \cdot C}\right) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) + Q_T \quad \text{avec} \quad Q_T = L \cdot \nabla \cdot (\delta \cdot \nabla (rh \cdot p_{vs}))$$

$$\left(\rho_s \cdot \frac{\partial w}{\partial rh}\right) \cdot \frac{\partial rh}{\partial t} = \nabla \cdot (\delta^* \cdot p_{vs} \cdot \nabla rh) + Q_w \quad \text{avec} \quad Q_w = \nabla \cdot (\delta \cdot rh \cdot \nabla p_{vs})$$

Ces deux équations font intervenir deux termes sources volumiques  $Q_T$  et  $Q_w$ , qui sont la base du couplage entre les transferts de chaleur et de masse :  $Q_T$  représente la contribution de la chaleur de sorption dans le bilan thermique et  $Q_w$  traduit l'influence d'un gradient thermique sur le transfert hydrique en phase vapeur par l'intermédiaire de la variation de pression de vapeur saturante et  $L$  désigne la chaleur latente de sorption [ $J \cdot kg^{-1}$ ].

### 3.2. Définition des paramètres d'entrée

Pour alimenter et proposer une modélisation numérique capable de reproduire les phénomènes de transport, de stockage d'humidité et de chaleur auxquels peut être soumise une paroi en conditions réelles, une campagne expérimentale pluridisciplinaire est réalisée sur les différents matériaux constituant la paroi. Cette étude s'est focalisée essentiellement sur l'analyse de l'état hydrique du matériau et de son évolution, sur les propriétés thermo-hydriques et mécaniques (Figure 2). Pour déterminer les contraintes générées par le retrait et le gonflement durant sa durée de vie, un critère de rupture caractérisant la transition entre un comportement mécanique élastique et post-élastique est défini par la détermination des propriétés mécaniques en traction et en compression sous différentes sollicitations hydriques. Ensuite, la valeur critique du critère de rupture exprimée en termes de contraintes en fonction de la teneur en eau est implémentée dans le modèle numérique, et permet par la suite de déterminer l'intervalle d'hygrométrie admissible pour empêcher l'apparition de fissures dans la paroi.

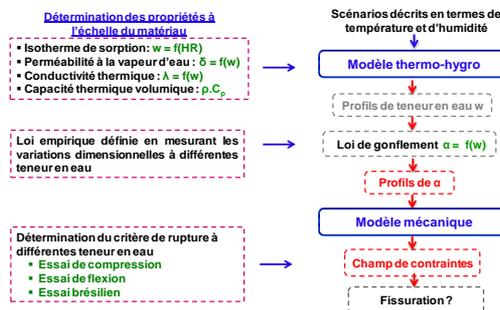


Figure 2. organigramme du développement du modèle couplé thermo-hygro-mécanique

#### 4. Résultats numériques

L'étude porte sur une maison individuelle d'habitation de type T4, sur laquelle sont effectuées des Simulations Thermiques Dynamiques (STD) au moyen du logiciel Pleiades-Comfie. L'évolution de température interne donnée par la STD est utilisée comme donnée d'entrée pour les conditions aux limites du modèle de paroi aux éléments finis. En revanche, l'évolution d'humidité relative ambiante est inconnue, et va être calculée pas à pas par le modèle numérique, à partir d'une équation de bilan hydrique sur l'air de la zone. Afin d'évaluer l'effet de tampon hydrique du mur en terre crue, deux types de cloison interne sont comparés (*Erreur ! Source du renvoi introuvable..a*) :

- dans la version de base, toutes les cloisons internes sont des cloisons légères en plaques de plâtre.
- dans la version dite Brique, la paroi de brique remplace certaines cloisons internes légères sur une surface 30,8 m<sup>2</sup>.

##### 4.1. Calcul hygrothermique

La Figure 3 représente l'évolution annuelle d'hygrométrie intérieure dans le cas d'utilisation d'une cloison de base et d'une cloison de brique de terre crue. Il est à noter que l'humidité intérieure est fortement influencée par la nature des cloisons, ce qui se traduit par une nette diminution de l'amplitude des variations quotidiennes dans le cas des briques de terre crue.

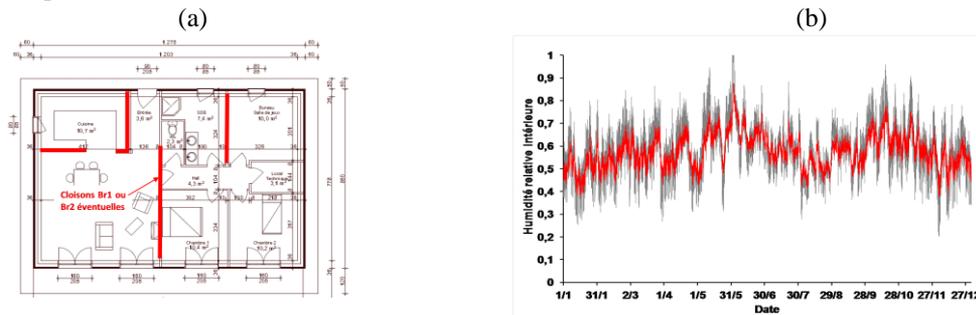


Figure 3. (a) plan du logement et implantation des cloisons en brique de terre crue et (b) évolutions annuelles de l'humidité relative intérieure avec cloison de base (-) et cloison en brique de terre (-).

Ce comportement peut être expliqué par l'effet absorbant de l'argile contenue dans la brique, permettant à la vapeur d'eau de s'imprégner jusqu'à ce que l'équilibre hygroscopique s'établisse entre le matériau et l'air. Cet échange dynamique permet de maintenir une hygrométrie admissible, autour de la zone de confort optimale de 40 à 60% rh, définie par Givoni. Il peut être conclu que les cloisons avec les briques en terre amènent à une baisse d'amplitude d'humidité annuelle de l'ordre de 50 % par rapport à celle de la cloison de base, avec des pics nettement inférieurs, de l'ordre de 45%.

##### 4.2. Conséquences mécaniques

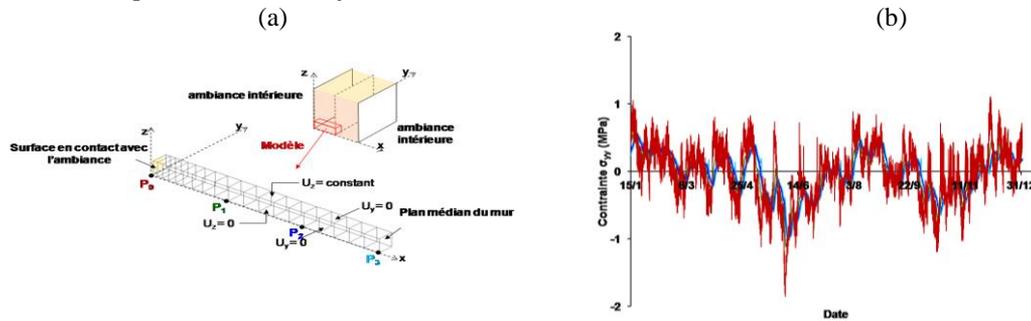
Un calcul mécanique est effectué toutes les heures sur une année de simulation. Les conditions aux limites mécaniques appliquées au mur sont les suivantes (Figure 4.a) :

- Blocage des déplacements horizontaux  $U_y$  parallèles au plan du mur
- Imposition des déplacements verticaux  $U_z$  à une valeur identique mais libre

##### • Résultats annuels

La Figure 4.b représente l'évolution annuelle de contraintes calculées au niveau de la brique sous les différentes sollicitations climatiques, et à différentes profondeurs du mur. La position des points de calcul est présentée sur la Figure 4.a. Selon les résultats de ces simulations, il s'avère que les contraintes maximales obtenues en traction ou en compression sont celles relevées à proximité de la surface du mur (point P<sub>0</sub>). Les contraintes calculées aux points P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> et P<sub>3</sub> sont moins sensibles aux phénomènes du retrait et de gonflement.

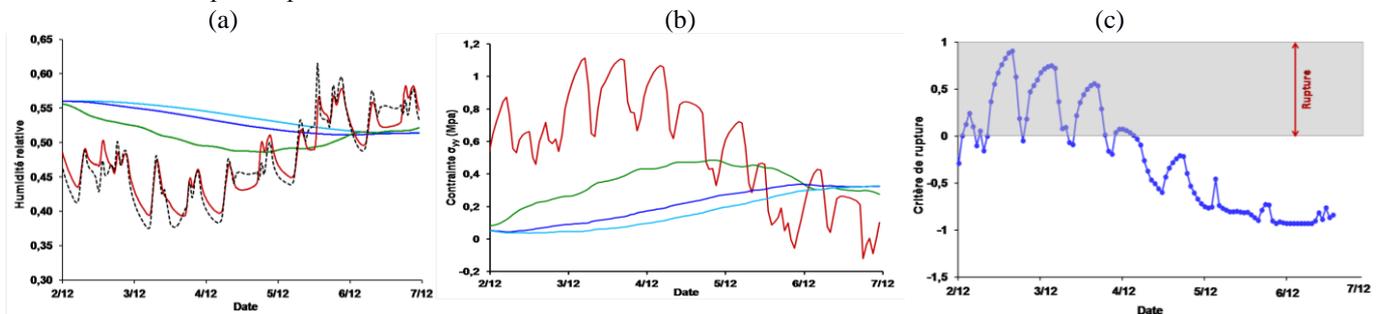
Ceci est à mettre en regard avec l'épaisseur de la couche qui assure les échanges hygrométriques. Il peut être observé aussi que les valeurs critiques des contraintes en traction sont atteintes en période froide (1,1 MPa), durant la première semaine de décembre (5 décembre). Par ailleurs, la composante minimale de  $\sigma_{yy} = 1,8$  MPa est obtenue en période estivale (1 juin).



**Figure 4.** (a) modèle mécanique pour le mur homogène et conditions aux limites et (b) évolutions annuelles des contraintes  $\sigma_{yy}$  à différentes profondeurs du le mur (—)  $P_0$ , (—)  $P_1$ , (—)  $P_2$  et (—)  $P_3$

- Etude détaillée d'une semaine critique

La Figure 5(a, b) représente respectivement l'évolution de l'humidité relative pendant la période où les humidités relatives sont les plus basses et les contraintes d'origine hydrique correspondantes à différentes profondeurs du mur. La Figure 5.a montre que les mécanismes de transfert hydrique sont beaucoup plus intenses sur la première couche du mur (point  $P_0$ ), puis s'uniformisent progressivement. Les courbes obtenues montrent que l'humidité calculée au niveau de la couche active suit l'équilibre ambiant de la pièce, avec un certain déphasage dû à la résistance superficielle. Par ailleurs, l'humidité à différentes profondeurs évolue progressivement dans l'épaisseur du mur. Il peut être noté que le changement dynamique entre le mur et l'environnement extérieur, expose la première couche du mur à des situations critiques (absorption et restitution d'humidité) conduisant à des dilatations ou des retraites dans le mur, générant des contraintes  $\sigma_{yy}$  allant jusqu'à 1,1 MPa en traction et -0,15 MPa en compression (Figure 5.b). Il peut être noté que l'évolution du critère de rupture représentée dans la Figure 5.c sous les différents cycles d'humidité relative (période du 2 au 7 décembre) est semblable à celle du champ de contrainte défini suivant  $yy$  (Figure 5.b). Dans les périodes de séchage du 2 au 4 décembre, le critère de rupture est dépassé, le matériau est alors soumis à de la traction dans les directions  $y$  et  $z$ . Dans des périodes d'humidification (4 au 7 décembre), le matériau est moins sollicité en traction et le critère n'est alors plus dépassé.



**Figure 5.** (a) évolution de l'humidité relative extérieure (---) et intérieure en différents points du mur : (—)  $P_0$ , (—)  $P_1$ , (—)  $P_2$  et (—)  $P_3$ . (b) évolution des contraintes générées par le retrait et le gonflement et (c) critère de rupture au niveau de la surface exposée à l'ambiance externe

### 5. Conclusion et perspectives

Dans le but de compléter la démarche entreprise pour développer les systèmes constructifs en terre, un outil numérique couplé thermo-hygro-mécanique a été développé. Les résultats numériques obtenus montrent que les cloisons en briques de terre participe pleinement au confort hygrométrique et que les mécanismes de transfert hydrique sont plus intenses sur la première couche du mur. Ce changement dynamique entre le mur et l'environnement extérieur, expose cette première couche du mur à des situations critiques qui dépassent le critère de rupture. Par ailleurs, l'humidité à différentes profondeurs évolue progressivement dans l'épaisseur du mur et les rends moins sensibles aux variations climatiques. Les conclusions tirées de ces travaux ouvrent de multiples pistes de réflexion pour des études futures : i) caractérisation du comportement mécanique des matériaux dans le domaine capillaire pour maîtriser la phase de séchage. ii) choix d'une approche viscoélastique, voire visco-élasto-plastique pour tenir compte des évolutions du matériau lors de son passage par des états de fortes teneur en eau.