

# Étude de la pertinence des hypothèses dans la modélisation hygrothermique du pisé

Lucile Soudani<sup>\*1,2</sup>, Antonin Fabbri<sup>1</sup>, Monika Woloszyn<sup>2</sup>, Pierre-Antoine Chabriac<sup>1</sup>, Anne-Cécile Grillet<sup>2</sup>, Jean-Claude Morel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LGCB-LTDS, UMR 5513, CNRS, Université de Lyon, École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE), rue Maurice Audin, 69518 Vaulx-en-Velin cedex, France

<sup>2</sup> LOCIE, Polytech Annecy-Chambéry, Campus scientifique, Savoie Technolac, 73376 Le Bourget-Du-Lac cedex, France

\*[lucile.soudani@entpe.fr](mailto:lucile.soudani@entpe.fr)

---

*RESUME. Le matériau terre pourrait être une réponse aux défis énergétiques liés au domaine du bâtiment, du fait de sa capacité à réguler l'humidité et à améliorer la qualité de l'air tout en maintenant une température intérieure relativement stable. Cependant, son impact sur les performances énergétiques globales des bâtiments reste mal identifié. Notre étude a pour objectifs de quantifier les effets des transports de masse et de chaleur, et des changements de phases ayant lieu à l'intérieur des pores, sur le comportement hygrothermique du matériau terre. Pour cela, un modèle hygrothermique couplé a été développé. Le modèle est validé par comparaison avec des résultats expérimentaux obtenus sur les murs en pisé de taille métrique. La pertinence de l'hypothèse visant à négliger les effets de variation de la température sur la pression de liquide, à humidité relative constante, a été évaluée à travers l'analyse de la précision du modèle par simulations numériques sous COMSOL Multiphysics®.*

*MOTS-CLÉS : modèle hygrothermique ; transport de chaleur et d'humidité ; pisé.*

---

*ABSTRACT. Earthen materials might be a solution for energetic issues being faced in construction, given their abilities to buffer moisture and improve indoor air quality while keeping the internal temperature relatively stable. However, their impact on the global energy performance of the buildings remains unclear. Our study aims at quantifying the effects of heat and mass transports, and phase changes occurring within the pores, on the hygrothermal behavior of earthen materials. To achieve this, a coupled hygrothermal model is derived. This model is validated by comparison with experimental results measured on metric rammed earth walls. The relevancy of a certain simplifying assumption, i.e. neglecting the effects of temperature variations on liquid pressure, at constant relative humidity, is assessed through the analysis of the accuracy of the modeling, studied by numerical simulations on COMSOL Multiphysics®.*

*KEYWORDS : hygrothermal modeling ; heat and moisture transport ; rammed earth*

---

## 1. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment joue un rôle majeur dans les émissions de gaz à effet de serre en concentrant environ 40% de la consommation en énergie. De plus, la plupart des matériaux de construction, y compris les isolants, génèrent une consommation importante d'énergie, tant au moment de leur fabrication que de leur mise en place (forte énergie grise), tandis que leur recyclage n'est pas toujours

acquis (Harris, 1999). Par conséquent, le développement des constructions en terre apparaît comme une alternative durable aux constructions conventionnelles (Sameh 2013).

D'autre part, le matériau terre présente un intérêt à travers son rôle dans la régulation de l'humidité et dans le contrôle de la température, qui est lié aux processus de changement de phase ayant lieu dans les pores (Liuzzi et al. 2013). Différents travaux se focalisent sur les quantifications expérimentales de ces transferts et leur modélisation (eg. (Desta, Langmans, and Roels 2011) or (Allinson and Hall 2010)). Une modélisation précise du comportement des fluides interstitiels est essentielle pour évaluer la performance énergétique et les capacités de contrôle en température et en humidité relative des constructions en terre (e.g. (Allinson and Hall 2010) , (Collet 2006)).

Si tous ces processus et couplages sont bien connus en théorie par la communauté scientifique, leur intégration dans un modèle complet et leur implémentation dans un code de calcul hygrothermique reste un défi scientifique. Pour atteindre cet objectif, certains auteurs (Whitaker 1977),(Gray 1983) partent de l'échelle microscopique et atteignent l'échelle macroscopique par prise de moyenne sur un volume représentatif. Ceci permet une meilleure vision des hypothèses requises. D'autres, (Philip and De Vries 1957; Künzle 1995),(Luikov 1975), adoptent une approche phénoménologique leur permettant de traiter les problèmes physiques directement depuis l'échelle macroscopique. Cette dernière approche a même conduit au développement de logiciels commerciaux (WUFI, Delphin) qui fournissent des résultats fiables sur une large gamme de matériaux et de sollicitations (Philip and De Vries 1957; Künzle 1995). Cependant, ces modèles simplifiés peuvent montrer quelques difficultés à reproduire avec précision le comportement hygrothermique de matériaux non conventionnels, comme la terre, lorsqu'ils sont soumis à d'importantes variations en température et en hygrothermie.

L'objectif de cet article est de quantifier l'influence d'une hypothèse faite lors de la dérivation des équations, dans le but d'examiner sa pertinence dans son application à l'étude du comportement hygrothermique du matériau terre.

## 2. MISE EN PLACE DU MODÈLE HYGROTHERMIQUE

Dans cet article, le pisé est modélisé comme la superposition d'un squelette solide (S) et un réseau poreux partiellement saturé par de l'eau liquide (L), supposée pure. L'espace poreux restant est rempli par une phase gazeuse continue (G), considérée comme un mélange parfait de gaz parfaits composé d'air sec (A) et de vapeur d'eau (V). La porosité ( $\phi$ ) est définie comme le volume actuel de milieu poreux par unité de volume initial de pisé, alors que le taux de saturation ( $S_r$ ) est défini par le volume actuel d'eau liquide par unité de volume poreux actuel. Ce dernier est relié à la teneur en eau massique ( $w = m_L/m_S$ , où  $m_L$  et  $m_S$  sont respectivement les masses de liquide et de squelette par unité de volume de pisé) à travers :

$$S_r = w \frac{\rho_d}{\phi \rho_L} \quad (1)$$

La proportion d'air sec et de vapeur d'eau dans la phase gazeuse est quantifiée par leur densité apparente  $\rho_I$  où I=A,V définis tels que :

$$\rho_I = \frac{m_I}{(1 - S_r)\phi}; \quad \rho_G = \sum_{I=A,V} \rho_I \quad (2)$$

## 2.1. ÉQUILIBRE LIQUIDE-VAPEUR

L'équilibre local entre l'eau liquide (L) et la vapeur (V) implique l'égalité de leur enthalpie spécifique. En supposant que la pression totale de gaz est constante, égale à la pression atmosphérique, la pression de liquide est reliée à l'humidité relative de l'air ambiant à travers la loi de Kelvin :

$$p_G - p_L = -\frac{\rho_L R T}{M_{H_2O}} \ln \varphi \quad (3)$$

Sous l'hypothèse des petites perturbations, cette dernière peut être estimée par (Coussy 2004) :

$$p_V^{sat} = p_V^{sat}(T_0) \exp \left\{ \frac{M_L}{RT} \left[ \frac{L_0}{T_{ref}} (T - T_{ref}) + (C_{p,V} - C_{p,L}) \cdot \left( T - \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) - (T - T_{ref}) \right) \right] \right\} \quad (4)$$

où  $L_0 = 2.26 \times 10^6$  J/kg est la chaleur latente de vaporisation de l'eau à  $T_{ref}=373K$  et  $p_G = p_L = 1\text{bar}$ .

D'autre part, la différentiation de la loi de Kelvin conduit aux équations suivantes :

$$dp_L = \frac{\rho_L R T}{M_{H_2O}} d \ln \varphi + \frac{\rho_L R \ln \varphi}{M_{H_2O}} dT ; dp_V = p_V^{sat}(T) d\varphi + \varphi \frac{dp_V^{sat}}{dT} dT \quad (5)$$

## 2.2. ÉQUATION DE CONSERVATION DE L'EAU

En ignorant le flux d'air dans le réseau poreux, la conservation de la masse de vapeur conduit à :

$$\frac{\partial m_V}{\partial t} = -\nabla \cdot \left( \rho_V \phi_G (\underline{V}_V - \underline{V}_G) \right) + m_{\rightarrow V}^{\circ} \quad (6)$$

où  $m_{\rightarrow V}^{\circ}$  est la masse de vapeur produite par les processus d'évaporation/condensation. Le terme  $\rho_V \phi_G (\underline{V}_V - \underline{V}_G)$  représente le transport diffusif de vapeur d'eau au sein de la phase gazeuse. Ce dernier peut être évalué à travers la loi de Fick qui est exprimée en termes de pression partielle de vapeur plutôt qu'en concentration massique (Janssen 2011). À noter que dans le cadre de gaz parfaits, les deux formulations sont équivalentes. En négligeant également le terme de gravité, on obtient :

$$\frac{\partial m_V}{\partial t} = \nabla \cdot \left( \frac{RT}{M_{H_2O}} D_s^V \nabla (p_V) \right) + m_{\rightarrow V}^{\circ} \quad (7)$$

Sachant que la vitesse relative du liquide dans le milieu poreux suit la loi de Darcy généralisée, la conservation de la masse d'eau liquide ( $m_L$ ) peut être écrite comme :

$$\frac{\partial m_L}{\partial t} = \rho_L \nabla \cdot \left( \frac{\kappa}{\eta_L} \nabla p_L \right) - m_{\rightarrow V}^{\circ} \quad (8)$$

L'eau dans le matériau est présente sous forme de liquide et de vapeur. En utilisant (1) et (4-6) et en négligeant la variation de teneur en eau avec la température à humidité relative constante, le bilan massique total d'eau ( $m_{H_2O} = m_L + m_V = \phi S_r \rho_L + \phi (1 - S_r) \rho_V$ ) est :

$$\frac{1}{\rho_L} \left( \rho_d \frac{\partial w}{\partial \varphi} + \phi_G \frac{M_{H_2O} \rho_V^{sat}(T)}{RT} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\phi_G \rho_V^{\alpha}}{\rho_L} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathcal{K}^T \nabla T + \mathcal{K}^{\varphi} \nabla \varphi) \quad (9)$$

Avec

$$\rho_V^{\alpha} = \varphi \frac{p_V^{sat}(T) M_{H_2O}}{RT} \left( \frac{1}{p_V^{sat}(T)} \frac{dp_V^{sat}(T)}{dT} - \frac{1}{T} \right) \quad (10)$$

$$\mathcal{K}^T = \frac{\kappa}{\eta_L M_{H_2O}} \frac{\rho_L R}{RT} \ln \varphi + D_s^V \frac{\varphi M_{H_2O}}{\rho_L RT} \frac{dp_V^{sat}(T)}{dT} \quad (11)$$

$$\mathcal{K}^\varphi = \frac{\kappa}{\eta_L M_{H_2O} \varphi} \frac{\rho_L R T}{RT} + D_s^V \frac{M_{H_2O}}{\rho_L RT} p_V^{sat}(T) \quad (12)$$

La principale différence entre (9) et l'équation classique utilisée dans les modèles hygrothermiques (e.g. (Künzel 1995)) vient de l'expression de l'hypothèse souvent faite, selon laquelle la variation de la pression liquide avec la température à humidité constante est négligeable, de manière à ce que l'humidité relative devienne le gradient moteur du flux. L'influence de cette hypothèse est discutée plus en détails dans la suite de cet article.

### 2.3. ÉQUATION DE LA CHALEUR

Le bilan enthalpique du mur conduit à une équation de la chaleur sous sa forme classique pour les milieux poreux avec des changements de phases dans les pores (e.g. (Fabbri et al. 2008)):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - m_{\rightarrow V}^* L(T, \varphi) \quad (13)$$

où  $\rho C_p$  est la capacité thermique moyenne à pression constante donnée par :

$$\rho C_p = (1 - \phi) \rho_S C_{p,S} + \phi S_r \rho_L C_{p,L} + \phi (1 - S_r) (\rho_A C_{p,A} + \rho_V C_{p,V}) \quad (14)$$

$L$  est la chaleur latente associée au changement de phase liquide/vapeur ayant lieu à un état différent de l'état de référence. En utilisant (3), elle peut être exprimée en fonction de la température et de l'humidité relative d'équilibre :

$$L(T, \varphi) = L_0 + (C_{p,V} - C_{p,L})(T - T_{ref}) + (\alpha_L T - 1) \frac{RT}{M_{H_2O}} \ln \varphi \quad (15)$$

Pour résoudre le système d'équation (9),(13), il est nécessaire d'avoir une évaluation du taux massique de changement de phase pouvant provenir des équations (7) ou (8). En optant pour l'équation (8) et en l'injectant dans (13), on obtient :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \left( L(T, \varphi) \rho_d \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathcal{L}^T \nabla T + \mathcal{L}^\varphi \nabla \varphi) \quad (16)$$

Avec

$$\mathcal{L}^T = \lambda - L(T, \varphi) \rho_L \frac{\kappa}{\eta_L M_{H_2O}} \frac{R}{RT} \ln \varphi \quad (17)$$

$$\mathcal{L}^\varphi = -L(T, \varphi) \rho_L \frac{\kappa}{\eta_L M_{H_2O} \varphi} \quad (18)$$

## 3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### 3.1. VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE DU MODÈLE

Le modèle est comparé à des données expérimentales mesurées sur des murs en pisé de dimensions 1 x 1.5 x 0.3 m<sup>3</sup>, collectées au centre du mur. Le dispositif expérimental est expliqué plus en détails dans (Chabriac et al. 2014). Il est placé dans une double chambre climatique dont un des côtés est contrôlé en humidité relative et température. Les conditions testées sont des variations sinusoïdales quotidiennes entre 15 et 20°C dans une atmosphère à 50% d'humidité relative, avec un

mur initialement saturé (cas d'un mur venant d'être fabriqué). Les paramètres utilisés pour les simulations ont été mesurés sur la même terre et sont reportés dans (Chabriac 2014).

Le système d'équations aux dérivées partielles (9)-(16) est résolu avec COMSOL Multiphysics® en utilisant le module PDE. Les simulations sont réalisées en 2D sur un rectangle de longueur  $L=0.5\text{m}$  et de hauteur  $H=1\text{m}$ . Les conditions limites utilisées correspondent aux mesures d'humidité relative et de température dans les enceintes. Celles-ci sont donc différentes de part et d'autres. Elles suivent une formulation de Neumann, dont les coefficients d'échange pour l'humidité relative et la température sont respectivement  $\beta = 25.10^{-9} \text{ kg/m}^2/\text{s}/\text{Pa}$  et  $\alpha = 8\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ .

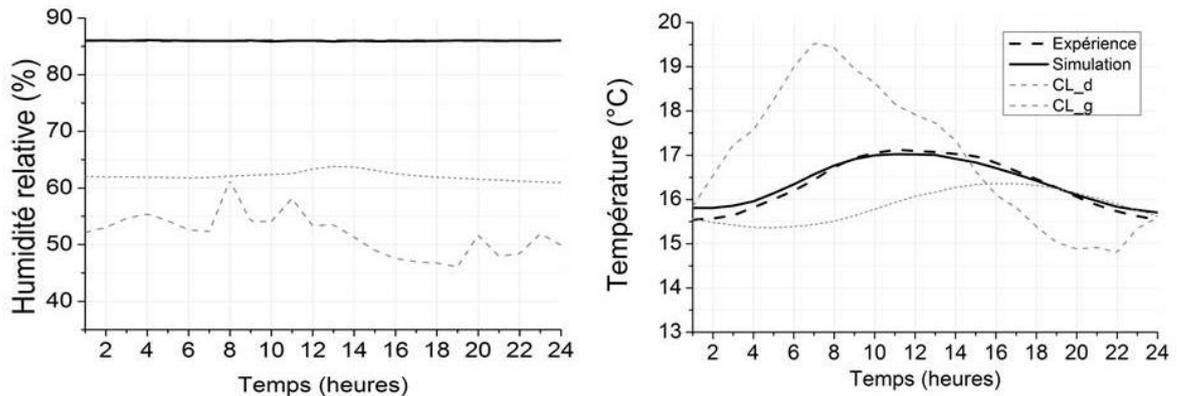


Figure 1 : Comparaison entre les valeurs mesurées et calculées au milieu du mur avec les conditions aux limites imposées à droite et à gauche.

À noter que même si seules les 24 premières heures sont présentées sur la Figure 1, la confrontation s'est effectuée sur une période de 3 semaines. Au sujet de la réponse en température, bien que les conditions aux limites appliquées soient différentes, la comparaison de la réponse au milieu du mur montre de bons résultats. En revanche, en termes d'humidité relative, étant donné un état initial très saturé du matériau, les conditions limites n'ont que peu d'influence sur le comportement au milieu du mur. Tout de même, il existe une bonne concordance entre les valeurs mesurées et simulées.

La comparaison entre les prédictions du modèle et les données expérimentales assure de la capacité du modèle à simuler précisément le comportement hygrothermique des murs en pisé, même s'il est nécessaire de garder à l'esprit que, pour cause de limitations expérimentales, les chemins de chargement considérés restent assez simples.

### 3.2. ÉVALUATION NUMÉRIQUE DE L'IMPACT DE L'HYPOTHÈSE

Afin de souligner les principaux avantages du modèle développé et d'étudier les singularités du comportement hygrothermique du pisé, il est nécessaire de simuler des sollicitations plus complexes. Pour ce faire, nous considérons 2 simulations, référencées comme LP1 et LP2, avec la même géométrie et les mêmes paramètres que ceux utilisés pour la validation expérimentale.

Le chemin de chargement LP1 considère deux cycles sinusoïdaux journaliers en humidité relative entre 70% et 50% à une température constante de 30°C. La durée d'étude est de 48h, afin de visualiser la réponse du mur dans le cas d'une période de pluie ponctuelle. Le chemin de chargement LP2 considère également deux cycles sinusoïdaux journaliers mais en température entre 0°C et 20°C à

humidité relative constante de 60%. La durée d'étude est de 100h afin de visualiser le temps de stabilisation de la réponse du mur. À noter qu'ici, les conditions aux limites appliquées sont identiques de part et d'autre du mur. Pour chacune de ces conditions, 2 simulations sont considérées. La première (« a ») repose sur le système d'équation (9)-(16) tel quel. Le deuxième (« b ») considère, comme plusieurs auteurs, que le flux de liquide est exclusivement conduit par un gradient d'humidité relative. Le terme dû aux variations de température sur le terme d'humidité (1<sup>er</sup> terme de l'équation 14) est donc simplifié. Les résultats des LP1 et LP2 pour les deux types de simulations, à deux points dans l'épaisseur du mur (Point B au milieu du mur, point D à 10cm de la surface) sont reportés Figure 2.

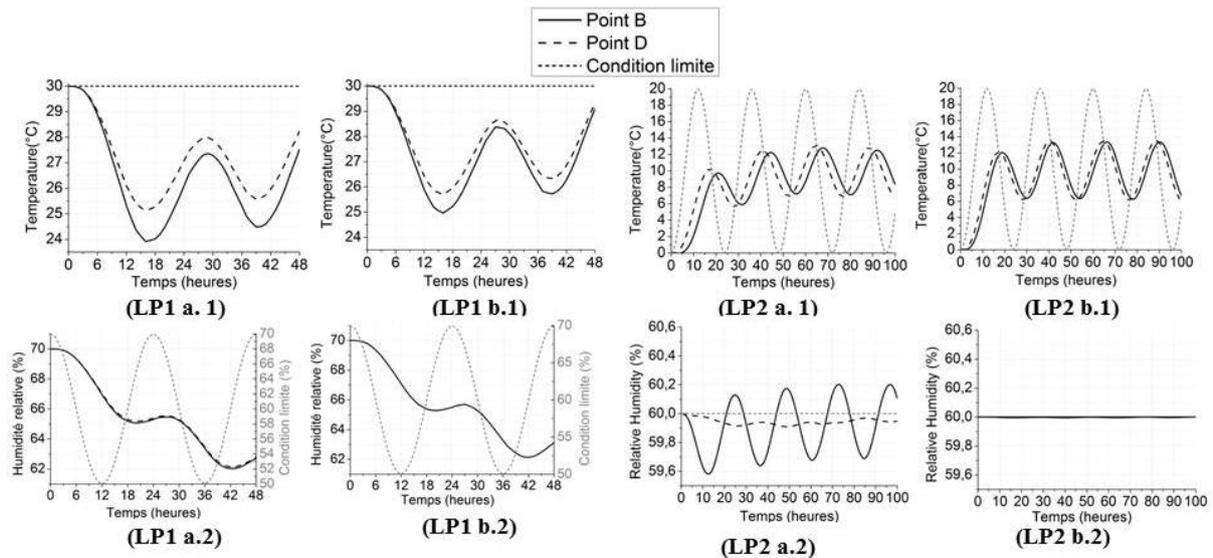


Figure 2 : Résultats des simulations de LP1 et LP2 pour différents points dans l'épaisseur du mur

Quel que soit le chemin de chargement considéré, la simplification du terme de température induit des différences remarquables et tend plus précisément à sous-estimer les effets du couplage hygrothermique. En effet, lorsque LP1 est suivi, les effets hygrothermiques sur la température due à la variation en humidité relative est réduite d'environ 1°C (une amplitude de 6.1°C sur LP1.a.1 au lieu de 5.1°C sur LP1.b.1). De l'autre côté, pas de différences majeures sont observées sur les variations d'humidité relative (Figures LP1.a.2 et LP1.b.2).

Les principales différences entre les simulations « a » et « b » apparaissent lorsque l'on considère LP2: à la fois l'amortissement des températures et l'inertie thermique apparente sont réduites dans le cas de la simulation « b » (l'amplitude au milieu du mur diffère d'environ 1.4°C : 3.7°C pour « a » et 5.1°C pour « b », alors que le déphasage entre les sollicitations et la réponse au milieu du mur est réduit d'environ 3h : 7h pour « a » et 10h pour « b ») (cf Figures LP2.a.1 et LP2.b.1).

Ces résultats soulignent le fait que l'impact du gradient thermique sur le transport d'eau liquide à humidité relative constante dans le pisé ne peut être négligé. Cependant, une modification significative du comportement hygrothermique va avoir lieu uniquement si une quantité d'eau suffisante est présente dans le milieu poreux. La nécessité de prendre en compte cet impact est certainement dû aux quantités non négligeables d'eau dans le pisé (notamment en raison de la présence des phases argileuses) et ce même en deçà de 60% d'humidité relative.

#### 4. CONCLUSION

Une nouvelle formulation, capable de simuler les transports de chaleur et de masse, tenant compte des effets dus aux changements de phase de l'eau à l'intérieur des murs en terre, est développée. Le principal avantage de ce modèle est de considérer séparément les cinématiques de chaque phase (eau liquide, vapeur d'eau, air sec, matrice solide), en interaction les unes avec les autres. Il prend également en compte l'impact du confinement sur les changements de phases liquide-vapeur, et par conséquent sur la chaleur latente relâchée ou absorbée.

La comparaison avec les mesures expérimentales sur un mur métrique met en évidence la capacité du modèle à reproduire correctement le comportement hygrothermique de ce matériau. Dans un second temps, le modèle est utilisé pour évaluer la précision et les impacts d'une hypothèse simplificatrice communément faite pour les modèles hygrothermiques des matériaux de construction. Il s'en suit que du fait de la spécificité du matériau considéré (fortes variations de teneur en eau, grande porosité, ...) il est nécessaire de prendre en compte l'impact du gradient thermique sur le flux d'eau.

#### 5. NOMENCLATURE

$C_{p,i}$  [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] : Capacité calorifique spécifique du composant I à pression constante

$D_e^V$  [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>] : Coefficient de diffusion effectif

$L$  [J/kg] : Chaleur latente de vaporisation

$m_i$  [kg] : Masse du composant I

$\dot{m}_{i \rightarrow v}^*$  [kg.s<sup>-1</sup>] : Taux massique de production de vapeur due au changement de phase

$M_{H_2O}$  [kg.mol<sup>-1</sup>] : Masse molaire de l'eau

$p_i$  [Pa] : Pression partielle du composant I

$p_v^{sat}$  [Pa] : Pression de vapeur saturante

$R$  [J.K<sup>-1</sup>.mol<sup>-1</sup>] : Constante des gaz parfaits

$S_r$  [-] : Taux de saturation

$T$  [K] : Température

$V_i$  [m.s<sup>-1</sup>] : Vitesse relative du composant I dans le milieu poreux

$w$  [-] : Teneur en eau massique

$\alpha_L$  [-] : Coefficient de dilatation thermique volumique du liquide

$\eta_L$  [Pa.s] : Viscosité dynamique de l'eau

$\kappa$  [m<sup>2</sup>] : Perméabilité au liquide

$\lambda$  [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] : Conductivité thermique

$\rho_i$  [kg.m<sup>-3</sup>] : Densité du composant I

$\varphi$  [-] : Humidité relative

$\Phi$  [-] : porosité

$\Phi_G$  [-] : porosité remplie par la phase gazeuse

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- Allinson, D, and M R Hall. 2010. "Hygrothermal Analysis of a Stabilised Rammed Earth Test Building in the UK." *Energy and Buildings* 42: 845–852.
- Chabriac, Pierre-Antoine. 2014. "Mise En Place de Procédés de Mesures Expérimentales Pour La Caractérisation Hygrothermique Du Pisé". ENTPE, Université de Lyon, France. (à paraître)
- Chabriac, Pierre-Antoine, Antonin Fabbri, J C Morel, Jean-Paul Laurent, and Joachim Blanc-Gonnet. 2014. "A Procedure to Measure the in-Situ Water Content in Rammed Earth and Cob." *Materials*
- Collet, F. 2006. "Study of the Thermal Behaviour of Clay Walls Facing South." *Building and Environment* 41: 307–315.
- Coussy, Olivier. 2004. *Poromechanics*. Edited by John Wiley & Sons.
- Desta, T.Z, J Langmans, and S Roels. 2011. "Experimental Data Set for Validation of Heat, Air and Moisture Transport Models of Building Envelopes." *Building and Environment* 46: 1038–1046.
- Fabbri, Antonin, Olivier Coussy, T Fen-Chong, and PJM Monteiro. 2008. "Are Deicing Salt Necessary to Promote Scaling in Concrete ?" *Journal of Engineering Mechanics* 134: 589–598.
- Gray, WG. 1983. "General Conservation Equations for Multi-Phase Systems." *Advances in Water Resources* 6: 130–140.
- Harris, D.J. 1999. "A Quantitative Approach to the Assessment of the Environmental Impact of Building Materials." *Building and Environment* 34: 751–758.
- Janssen, Hans. 2011. "Thermal Diffusion of Water Vapour in Porous Materials: Fact or Fiction?" *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 (March): 1548–1562.
- Künzel, H M. 1995. "Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One - and Two-Dimensional Calculation Using Simple Parameters - Report on PhD Thesis, Fraunhofer Institute of Building Physics". Vol. 1995.
- Liuzzi, S, M.R. Hall, P Stefanizzi, and S.P. Casey. 2013. "Hygrothermal Behaviour and Relative Humidity Buffering of Unfired and Hydrated Lime-Stabilised Clay Composites in a Mediterranean Climate." *Building and Environment* 61: 82–92.
- Luikov, A.V. 1975. "Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18 (Pergamon Press): 1–14.
- Philip, J.R., and D.A De Vries. 1957. "Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients." *Transactions, American Geophysical Union* 38: 222–232.
- Sameh, S.H. 2013. "Promoting Earth Architecture as a Sustainable Construction Technique in Egypt." *Journal of Cleaner Production*: 1–12.
- Whitaker, Stephen. 1977. *Simultaneous Heat, Mass, and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying*. Vol. 13.