

Analyse Numérique du Comportement Thermo-hydrrique de Briques de Terre Stabilisée au Ciment

Meriem Saidi¹, Amel Soukaina Cherif², Ezeddine Sediki³, Belkacem Zeghmati⁴

Unité de Rayonnement Thermique, FST, Université de Tunis El Manar 2092 Tunis, Tunisie

¹saidiimeriem@yahoo.fr

³sediki.ezeddine@gmail.com

LETTM, Département de physique, FST, Université Tunis El Manar

²amelsouka_cherif@yahoo.fr

LAMPS, Université de Perpignan Via Domitia, Perpignan, France

⁴zeghmati@univ-perp.fr

Abstract— L'utilisation de matériaux biosourcés dans la construction des habitats contribue à une réduction de la consommation énergétique consacrée aux besoins de chauffage et de climatisation. Dans ce travail, nous proposons une étude numérique du comportement hydro-thermique de matériaux de construction locaux composés de briques de terre compressée (BTC) et stabilisée au ciment. Dans ce matériau, assimilé à un milieu poreux, les transferts de chaleur et de masse sont décrits par le modèle de Luikov. Les équations sont adimensionnées puis résolues par un schéma implicite aux différences finies et la méthode itérative de Gauss-Seidel. Les résultats sont présentés par les évolutions spatio-temporelles de la température et de la teneur en eau au sein du matériau. Nous analysons l'influence de la température de l'air dans lequel la BTC est disposée et la concentration de ciment sur les évolutions spatio temporelle de la température et de la teneur en eau du matériau.

Mots clés— Transfert de chaleur et de masse, matériau de construction bio-sourcé, briques de terre stabilisée, modèle de Luikov, différences finies

I. INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies la terre a, comme matériau de construction durable, suscité un important regain d'intérêt. Ainsi, environ 15% des œuvres architecturales inscrites sur la liste du patrimoine mondial de l'Unesco sont construites en terre [1]. De nos jours, les matériaux biosourcés constituent une alternative prometteuse aux matériaux de construction conventionnels. Il a été montré que la terre est un matériau qui répond aux exigences de la protection de l'environnement et contribue à un gain énergétique appréciable pour assurer le confort thermique dans l'habitat. Pittet et al [2] ont montré, par une étude comparative entre les différentes technologies de construction (terre, béton, brique et pierre), les avantages économique et environnemental de ce matériau. Ils ont également indiqué que l'utilisation de l'adobe et de torchis comme matériau de construction d'un habitat contribuait à réduire sensiblement sa consommation énergétique et donc les émissions de CO₂.

Une étude comparative du comportement thermique d'habitats construits en bois, en pierre et en pisé, a montré que l'ambiance interne la plus confortable était, sous le

climat de l'Espagne, obtenue avec le pisé comme matériau de construction [3]. Les matériaux de construction à base de terre sont très sensibles à l'eau. Par conséquent les conditions thermiques et hygrométriques ambiantes influencent les transferts de chaleur et de masse qui se développent dans ces matériaux. Aussi, l'étude des transferts simultanés de chaleur et de masse qui se produisent dans ces matériaux s'avère indispensable pour l'évaluation de leurs performances thermiques.

De nombreux travaux, aussi bien numériques qu'expérimentaux, ont été réalisés pour analyser l'influence de la température et de l'humidité relative de l'air ambiant sur les transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux. Philip et De Vries [4] ont élaboré un modèle qui caractérise les transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux non saturés. Luikov [5] a établi un modèle qui décrit les transferts couplés dans les milieux poreux hygroscopiques tenant compte du phénomène de thermo-diffusion l'intérieur du matériau. Crausse et al. [6] ont étudié deux modèles de calcul des répartitions spatiales de température et d'humidité dans une paroi de bâtiment. Ces modèles ont été appliqués à plusieurs types de matériaux de construction conventionnels tels que le bois [7], le mortier-ciment et le grès [8], le béton cellulaire autoclavé et la brique à perforations [9] et d'autres bio-sourcés tels que le béton de chanvre [9,10], le béton de liège [11], le pisé [12] et les briques de terre stabilisées [13]. Ces travaux s'avèrent indispensables non seulement pour la caractérisation des matériaux mais aussi pour l'évaluation précise des performances d'un bâtiment.

La présente étude concerne une modélisation numérique des transferts hygrothermiques dans un échantillon de BTC. Les transferts simultanés de chaleur et de masse sont décrits par le modèle de Luikov. Nous analysons, l'influence de la température de l'air dans lequel l'échantillon de BTC est placée et la concentration du liant minéral (ciment) dans la BTC, sur les transferts hygrothermiques dans le matériau.

II. MATERIAUX ETUDIÉS

Les propriétés thermique et massique de bloc de terre comprimée (BTC) et de blocs de terre comprimée et stabilisée au ciment (BTSC) sont reportées dans le tableau 1.

La stabilisation de la terre est obtenue par l'ajout d'un liant chimique, le ciment, avec trois teneurs 8, 10 et 12% du poids du sol.

III. FORMULATION DU PROBLÈME

Le modèle physique est composé d'un bloc de terre comprimée assimilé à un parallélépipède de dimensions ($L \times l \times h : 30 \times 14 \times 7 \text{ cm}^3$) placé dans l'air (figure 1). Nous posons les hypothèses suivantes :

- Les transferts de chaleur et de masse sont bidimensionnels,
- Les propriétés thermo-physiques du matériau sont constantes,
- La température et l'humidité relative de l'air dans lequel la BTC est placée sont constantes,
- Le matériau est assimilé à un milieu homogène et isotrope,
- Le matériau ne subit au cours du temps aucune déformation,

Soit le référentiel Cartésien (xoy) tel que l'origine soit placée à l'extrémité inférieure gauche de la BTC. L'abscisse x est comptée positivement de gauche à droite et l'axe oy , perpendiculaire à ox , est orienté dans le sens opposé à la gravité,

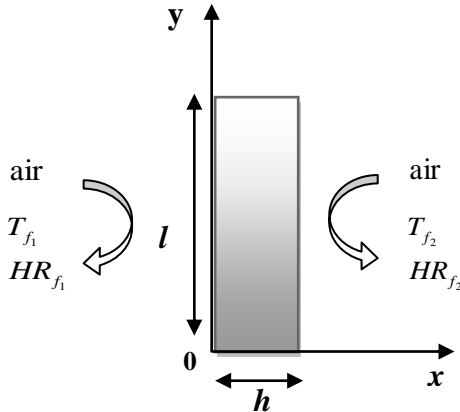


Fig. 1 Modèle physique et référentiel

A. Equations de transfert

Les transferts couplés de chaleur et de masse dans le matériau sont décrits par le modèle de Luikov (1975) [5]. En tenant compte de ces hypothèses simplificatrices formulées ci-dessus les équations adimensionnelles du modèle de Luikov s'écrivent dans le référentiel (Oxy) :

- Equation d'énergie

$$\frac{\partial T^+}{\partial t^+} = \frac{\partial^2 T^+}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 T^+}{\partial y^{+2}} + \varepsilon \cdot Ko \frac{\partial w^+}{\partial t^+}$$

- Equation de transfert d'humidité

$$\frac{\partial w^+}{\partial t^+} = Lu \left(\frac{\partial^2 w^+}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 w^+}{\partial y^{+2}} \right) + Lu \cdot Pn \left(\frac{\partial^2 T^+}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 T^+}{\partial y^{+2}} \right)$$

B. Conditions initiale et aux limites

Aux équations de transfert nous associons les conditions initiale et aux limites suivantes :

- Condition initiale

$\forall t^+ < t_0^+, t_0^+$ étant le temps adimensionnel à partir duquel l'échantillon de BTC et de BTSC est soumis à un apport de chaleur et de masse par convection.

- En $x^+ = 0$ et $x^+ = h/l ; 0 \leq y^+ \leq 1$

$$\frac{\partial T^+}{\partial x^+} = Bi_i (T^+ - 1) + (1 - \varepsilon) \cdot Lu \cdot Bi_m \cdot Ko \cdot (w^+ - (w_f / w_0))$$

$$\frac{\partial w^+}{\partial x^+} + Pn \cdot \frac{\partial T^+}{\partial x^+} = Bi_m (w^+ - (w_f / w_0))$$

- En $y^+ = 0$ et $y^+ = 1 ; 0 \leq x^+ \leq h/l$

$$\frac{\partial T^+}{\partial y^+} = 0$$

$$\frac{\partial w^+}{\partial y^+} = 0$$

A $x^+ = 0$ et $x^+ = h/l, 0 \leq y^+ \leq 1, w^+(x, y)$ est déterminé à partir de l'isotherme de sorption d'Hunderson:

$$HR = 1 - \exp.(-k \cdot T \cdot w^n)$$

k et n , des constantes caractéristiques des BTC et BTSC déterminées expérimentalement à partir de leurs isothermes de sorption (Tableau 2).

C. Nombres adimensionnelles caractérisant le problème

Dans les équations et les conditions aux limites adimensionnelles interviennent les nombres adimensionnels suivants:

- Nombre de Kosovich

$$Ko = \frac{L_v \cdot \omega_0}{C_p \cdot \Delta T}$$

- Nombre de Luikov

$$Lu = \frac{D_T}{D_m}$$

- Nombre de Posnov

$$Pn = \frac{\delta \cdot \Delta T}{\omega_0}$$

- Nombre de Biot thermique et massique respectivement

$$Bi_t = \frac{h_i \cdot L}{\lambda}; Bi_m = \frac{h_m \cdot L}{D_m}$$

IV. METHODOLOGIE NUMÉRIQUE

Les équations de transferts, les conditions initiale et aux limites qui leurs sont associées sont résolues par une méthode implicite aux différences finies et la méthode itérative de Gauss Seidel. Le critère de convergence que nous avons retenu est égale à 1.10^{-6} .

A. Maillage adopté

Pour analyser la sensibilité des résultats au maillage du domaine d'étude nous avons considéré quatre maillages (71×71 , 59×57 , 54×41 et 52×36). Les valeurs de la température et de la teneur en eau au niveau de la face externe ($x^+=0$) et la face interne ($x^+=h/l$) du matériau obtenues pour ces quatre maillages montrent que l'écart relatif maximal les valeurs de la température et celles de teneur en eau obtenues avec les maillages (54×41) et (52×36) n'excède pas 1%. Le maillage (54×41) est alors adopté pour la suite de ce travail.

TABLE I
PROPRIETES THERMOPHYSIQUES DES MATERIAUX

Matériaux	ρ (Kg/m ³)	λ (w/m.k)	D_T (m ² /s)	D_m (m ² /s)
BTC	1786,1	0,7983	6,87618E-07	1,01E-09
BTSC 8	1776	0,9639	9,86794E-07	8,24E-10
BTSC 10	1815	1,0776	1,07949E-06	7,38E-10
SEBC 12	1881,6	1,1	1,06293E-06	7,08E-10

B. Validation du code de calcul

Afin d'assurer la validité de notre programme, nous avons comparé nos résultats avec quelques résultats de la littérature. Les distributions de la température et d'humidité déterminées numériquement par le modèle de Luikov, pour un problème de transfert de chaleur et de masse dans une couche de bois pendant le séchage, sont comparés avec celles obtenues par la solution analytique de Lui et al [14] (Fig. 2).

TABLE III
COEFFICIENTS DE L'ISOTHERME DE DÉSORPTION DE LA BTC ET DES BTSC

Matériaux	k	n
BTC	3,0599	1,9648
BTSC 8	5,6817	2,0011
BTSC 10	12,449	2,1489
BTSC 12	10,4156	2,0809

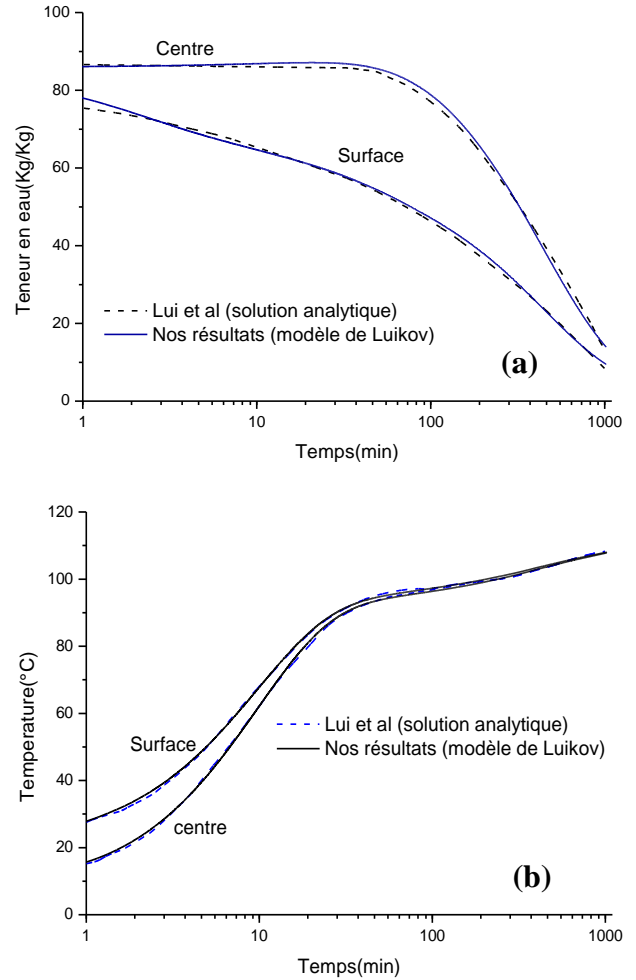


Fig. 2 Teneur en eau (a) et température (b) au milieu et à la surface de la couche du bois pendant le séchage

V. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

L'ensemble des résultats présentés se rapporte à l'étude des transferts couplés de chaleur et de masse qui se produisent au sein des briques de terre comprimée. A l'instant initial, la température (T_0) et la teneur en eau du matériau (w_0) sont prises égales respectivement à $T_0=20^\circ\text{C}$ et $w_0=6\%$. Les deux faces verticales du BTC sont maintenues aux températures, $T_{f1}=35^\circ\text{C}$ et $T_{f2}=25^\circ\text{C}$. L'humidité relative de l'air au contact de ces faces est $HR_{f1}=70\%$ et $HR_{f2}=50\%$. Les valeurs des propriétés thermo-physiques du matériau que nous avons utilisés dans les calculs sont reportés dans les tableaux 1 et 2.

A. Profils de température et de teneur en eau

Les figures 3 et 4, représentent l'évolution temporelle de la température et de la teneur en eau, au milieu et sur les faces d'une brique de terre comprimée BTC.

Il est noté que la température au sein du matériau augmente au cours du temps jusqu'à atteindre une valeur sensiblement constante. La quantité de chaleur apportée au matériau par convection se compose d'une quantité de chaleur sensible et d'une chaleur latente. La quantité de chaleur latente provoque l'évaporation de l'eau liquide à la surface du matériau et la quantité de chaleur sensible assure l'accroissement de la température du matériau.

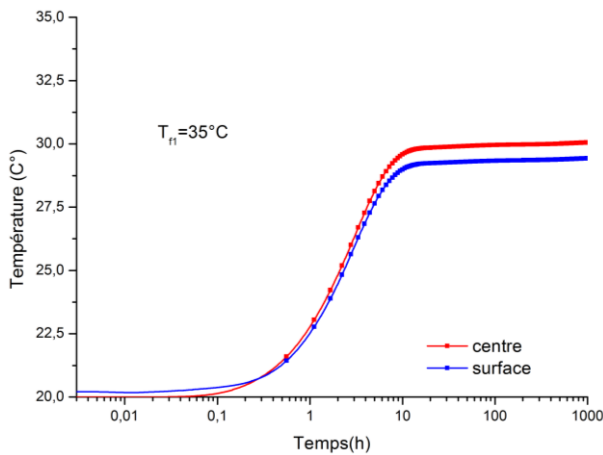


Fig. 3 Evolution au cours du temps de la température du matériau

Il est à noter que pour une température de fluide $T_{f1}=35^{\circ}\text{C}$, la température à la surface du matériau est après 1h inférieure à celle en son milieu. Ce résultat démontre que pour cette température du fluide la quantité de chaleur sensible combinée à l'inertie thermique du matériau n'est pas suffisante pour contrebalancer l'effet de la chaleur latente qui assure l'évaporation de l'eau à la surface du matériau.

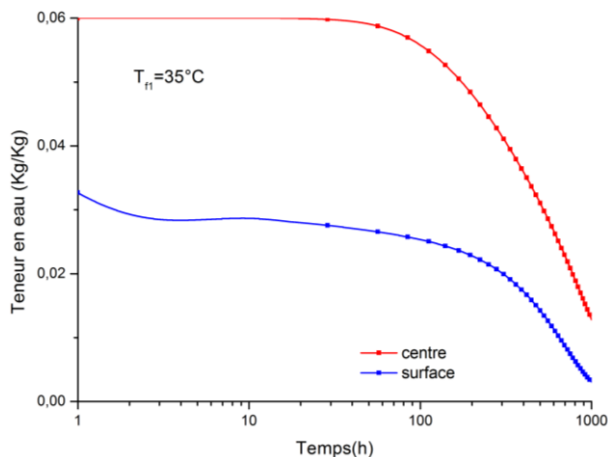


Fig. 4 Evolution au cours du temps de la teneur en eau du matériau

Cet apport de chaleur provoque une migration de l'eau du sein du matériau vers sa surface où l'eau s'évapore. La diminution au cours du temps de la teneur en eau à la surface

du matériau est plus prononcée que celle en son centre parce que l'évaporation d'eau à la surface est principalement régit par le gradient de concentration de vapeur d'eau entre celui à la surface et celui de l'air dans lequel le matériau est disposé. L'évolution au cours du temps de la teneur en eau au milieu du matériau dépend de la quantité de chaleur transférée par conduction de la surface vers l'intérieur du matériau, du coefficients de thermo-migration et de diffusion massique dont les valeurs sont très faibles.

B. Influence de la température de l'air

Les figures 5 et 6 ont été obtenues en considérant l'humidité relative de l'air dans lequel le BTC est placé et la température T_{f2} , constantes. Nous analysons l'influence de la température de l'air T_{f1} (30°C , 35°C , 40°C et 45°C) sur les distributions spatio-temporelles de température et de teneur en eau dans la BTC

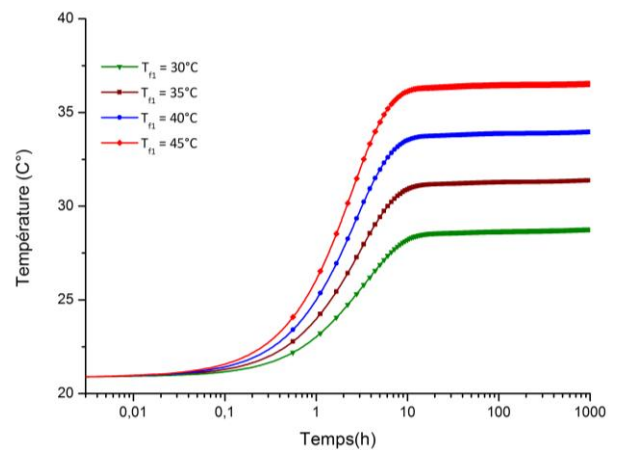


Fig. 5 Evolution au cours du temps de la température du matériau Influence de la température de l'air

L'analyse des profils de la température montre qu'après chaque augmentation de la température extérieure, la température au sein du matériau tend à augmenter rapidement. Cette élévation est due aux transferts de chaleur par convection à la surface et par conduction au sein du matériau. Pour la variation de la teneur en humidité à l'intérieur du matériau nous avons constaté que la teneur en eau du BTC est d'autant plus élevée que la température de l'air est importante, ce qui confirme l'effet de la température sur le transfert de masse dans les matériaux en terre

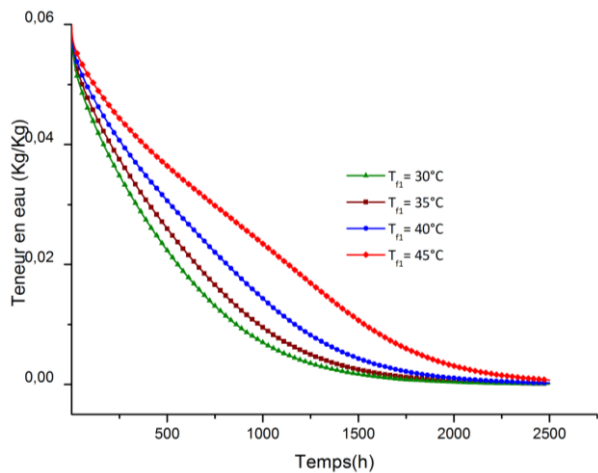


Fig. 6 Evolution au cours du temps de la teneur en eau du matériau
Influence de la température de l'air

C. Influence d'un liant: le ciment

Sur les figures 7 et 8, nous présentons les évolutions de la température et de la teneur en eau dans une BTC et trois briques de terre comprimée et stabilisée au ciment: la BTSC8, la BTSC10 et la BTSC12. L'examen de ces courbes montre que l'ajout de ciment provoque un accroissement de la température. L'addition de ciment à la terre lors de l'élaboration de la BTSC engendre une modification des propriétés thermo-physiques de la BTSC notamment de sa conductivité thermique qui est supérieure à celle de la BTC [15] (Table 1).

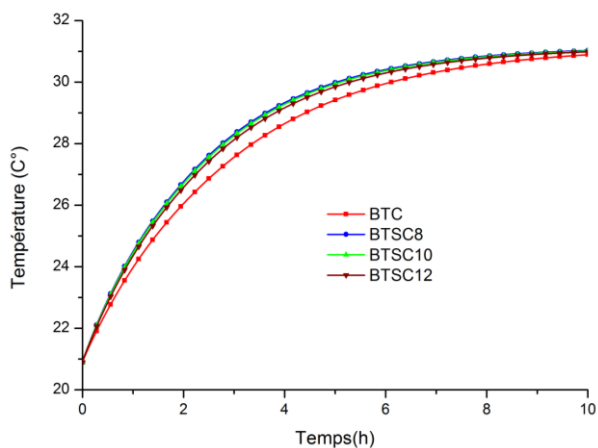


Fig. 7 Evolution au cours du temps de la température de BTC et BTSC.
Influence de l'ajout du ciment

Nous remarquons que la BTC possède une teneur en eau inférieure à celle des trois BTSC (Figure 7). Ce résultat est dû à l'impact de l'incorporation de ciment dans la BTC qui affecte fortement sa porosité et réduit donc sa hygroscopicité [16] et la quantité d'eau qui migre par diffusion du milieu à la surface du matériau.

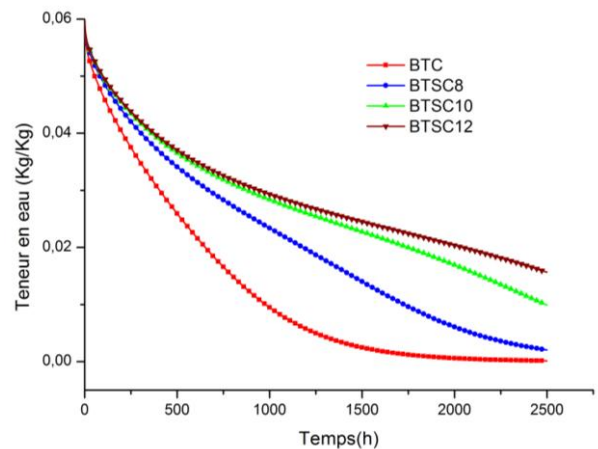


Fig.8 Evolution au cours du temps de la teneur en eau de BTC et BTSC.
Influence de l'ajout du ciment

VI. CONCLUSIONS

Nous avons procédé à une étude numérique du comportement hygrothermique des matériaux de construction à base de terre. Les équations des transferts de chaleur et de masse, basées sur le modèle de Luikov, sont résolues par une méthode implicite aux différences finies et la méthode itérative de Gauss Seidel. Les résultats montrent que les transferts de chaleur et de masse sont fortement influencés par la température de l'air. La diminution au cours du temps de la teneur en eau du matériau est d'autant plus importante que la température de l'air dans lequel l'échantillon de matériau de construction à base de terre est placé. Il apparaît également que l'ajout de ciment au brique de terre comprimée diminue son isolation thermique et réduit son hygroscopicité.

REMERCIEMENT

Ce travail a été réalisé au sein de l'Unité de Rayonnement Thermique en collaboration avec le laboratoire de Mathématique et Physique LAMPS, dans le cadre d'une thèse en cotutelle entre l'Université de Tunis El Manar et l'Université de Perpignan Via Domitia.

NOMENCLATURE

L_v : Chaleur latente de vaporisation (JKg^{-1})
 C_p : Chaleur spécifique ($\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
 δ : Coefficient de thermo-migration (K^{-1})
 λ : Conductivité thermique ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
 D_T : Diffusivité thermique (m^2s^{-1})
 D_m : Diffusivité massique (m^2s^{-1})
 h_t : Coefficient d'échange thermique ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
 h_m : Coefficient d'échange massique (ms^{-1})
+ : Grandeur adimensionnelle

REFERENCES

- [1] Gandru. D, Delboy. L, sous la direction de Joffroy T. , CRAterre-ENSAG 010. Patrimoine mondial, Inventaire et situation des biens construits en terre, UNESCO/CPM, Paris, 2010.
- [2] Pittet, D., Kotak T. Environmental impact of building technologies, a comparative study in Kutch District, Gujarat State, India. Ecomateriales 4, Paths towards, Sustainability conference, November 2009, Bayamo, Cuba
- [3] Martin, S., Mazarron, F.R., Canas, I. Study of thermal environment inside rural houses of Navapalos (Spain): The advantages of reuse
- [4] buildings of high thermal inertia. Construction and Building Materials 24, 666-676, 2010.
- [5] J.R.Philip, D.A.Devries. Moisture mouvement in porous materials under temperature gradients. Transaction, American Geophysical Union, v.38, N°2,1957.
- [6] A.V.Luikov. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (review), International journal of heat and mass transfer, vol.18,1-14,1975.
- [7] P.Crausse, G. Bacon et S. Bories, Etude fondamentale des transferts couples chaleur-masse en milieu poreux, International journal heat and mass transfer. vol 24, No.6, 991-1004, 1981.
- [8] Abahri.K, Belarbi.A, Trabelsi.A, Contribution to analytical and numerical study of combined heat and moisture transfers in porous building materials, Building and environment 46,1354-1360,2011.
- [9] Qin.M, Aït-Mokhtar.A, Belarbi.R, Two-dimensional hygrothermal transfer in porous building materials, Applied Thermal Engineering 30,2555-2562,2010.
- [10] Samri Driss, Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique, Thèse de l'institut national des sciences appliquées de Lyon,2008.
- [11] Maalouf C, Tran Le A D, Mai T H, Wurtz E, Simulation des transferts hygrothermiques d'une paroi en béton de chanvre en régime dynamique. Conférence nationale IBPSA France, 2008.
- [12] Sotehi.N, Chaker.A, Numerical analysis of simultaneous heat and mass transfer in crok lightweight concretes used in building envelopes. *Eighth International conference on material sciences (CSM8-ISM5)*,v.55,429-436,2014.
- [13] David Allinson, Matthew Hall, Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK.Energy and Buildings 42, 845-852, 2010.
- [14] Pierre Meukam, Albert Noumowe. Modeling of heat and mass transfer in lateritic building envelopes. Heat Mass Transfer 42: 158-167, 2005.
- [15] J.Y. Liu, S. Cheng, Solution of Luikov equations of heat and mass transfer in capillary porous bodies, International Journal of Heat and Mass Transfer
- [16] Balaji NC, Mani M and Venkatarama, Reddy BV, Thermal conductivity studies on Cement-stabilised soil blocks. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Construction Materials*, 2015.
- [17] Alessandro Arrigoni, Anne-Cécile Grillet, Renato Pelosato, Giovanni Dotelli, Christopher T.S. Beckett , Monika Woloszyn, Daniela Ciancio. Reduction of rammed earth's hygroscopic performance under stabilisation: an experimental investigation. Building and Environment 115, 358-367, 2017.