

Etude expérimentale des propriétés thermiques de briques de terre avec ajout de déchets de mil par une méthode plan chaud centré asymétrique

Harouna BAL*, Yves JANNOT**, Salif GAYE*, Alain DEGIOVANNI**

*LEA, BP 5085, Dakar Fann, Sénégal

**Université de Lorraine, LEMTA, UMR 7563, Vandoeuvre-lès-Nancy, F-54500, France

**CNRS, LEMTA, UMR 7563, Vandoeuvre-lès-Nancy, F-54500, France

bal_harouna@yahoo.fr

yves.jannot@ensem.univ-lorraine.fr

sgaye2@yahoo.fr

alain.degiovanni@univ-lorraine.fr

Résumé : L'usage empirique et traditionnel des déchets de mil mélangés avec de la latérite dans la fabrication des briques est largement répandue dans l'espace sahélien et en particulier au Sénégal. L'objet de cette étude est de caractériser les propriétés thermiques de ces briques composites en fonction de la teneur en eau et en gousse de mil. Des échantillons ayant cinq teneurs en déchets de mil différentes allant de 0 à 0,122 $\text{kg}_{\text{mi}} \cdot \text{kg}_{\text{lat}}^{-1}$ avec des dimensions de $10 \times 10 \times 3 \text{ cm}^3$ ont été fabriqués. Un dispositif de mesure de type plan chaud asymétrique a été développé et modélisé pour mesurer la capacité thermique volumique et la conductivité thermique de ces échantillons dont on a fait varier la teneur en eau de 0 à 0,1 $\text{kg}_w \cdot \text{kg}_{\text{dm}}^{-1}$. Une technique adaptée d'ensachage a été mise au point pour éviter les phénomènes d'évaporation sur les faces latérales. Les expériences ont permis de mesurer les variations de la conductivité thermique et de la capacité calorifique en fonction des teneurs en mil et en eau. Elles ont également montré que l'ajout de déchets de mil permet de diminuer de manière très significative la conductivité thermique des briques de latérite

Mots clés :

Matériau poreux composite, Humidité, Modèle, Porosité, Densité, Capacité thermique, teneur en eau, teneur en déchets de mil, Conductivité thermique, matériau isolant.

1. Introduction

L'ajout d'un isolant dans un matériau de construction est l'une des méthodes les plus simples pour améliorer ses propriétés thermiques. Cette méthode est traditionnellement utilisée dans beaucoup de pays sahéliens et en particulier au Sénégal où les déchets de mil sont mélangés avec de la latérite pour faire des briques utilisées comme matériau de construction. Ces déchets représentés sur la Figure 1 de faible densité devraient avoir une conductivité relativement faible. Ils sont disponibles en très grande quantité et leur coût est pratiquement nul.



Figure 1 : Photo de déchets de mil utilisés comme matériau isolant

Quelques études concernant les matériaux à base de terre sont déjà disponibles dans la littérature. Certains font état de l'influence des isolants naturels sur des matériaux de base mais sans tenir compte de la teneur en eau ([1] à [5]).

2. Dispositif expérimental et méthode de mesure

Etant donné qu'il est difficile d'obtenir deux échantillons avec exactement les mêmes teneurs en eau, la conductivité thermique et la capacité thermique volumique ont été mesurés à l'aide d'un dispositif de type plan chaud asymétrique. Une vue et un schéma de ce dispositif sont présentés sur la figure 2. Le thermocouple disposé au centre de l'élément chauffant est placé côté isolant déformable ce qui permet de minimiser la résistance de contact entre l'élément et l'échantillon. Ce dernier est disposé dans un sachet en plastique étanche

pour éviter l'évaporation sur les faces latérales qui induit des transferts de chaleur non pris en compte dans le modèle.

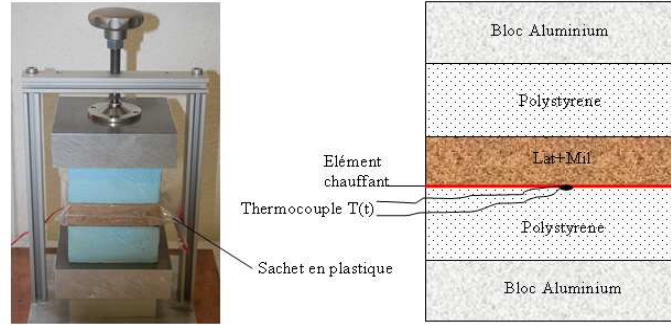


Figure 2 : Dispositif de type plan chaud asymétrique

2.1 Préparation des échantillons

La poudre de latérite est extraite directement du sol de la région de Matam au nord du Sénégal. Le prélèvement broyé est ensuite tamisé jusqu'à obtenir des granulats ayant un diamètre maximum de 1 mm. Puis la latérite est mélangée aux déchets de mil avec un pourcentage fixe de ce dernier. On y ajoute de l'eau jusqu'à obtenir une pâte homogène que l'on presse dans un moule de dimensions intérieures 10x10x3 cm³ sous une pression de 1 bar [6]. Les échantillons retirés sont placés dans des sachets en plastique pour homogénéiser l'humidité dans l'ensemble de l'échantillon. La première mesure de la conductivité a été réalisée le moment où l'on a sorti l'échantillon du moule. Les autres après chaque séchage de l'échantillon à l'air ambiant puis fermeture du sachet pour la stabilisation de l'humidité. La dernière mesure est obtenue après mise sous vide pendant 3 jours sous une pression de 10⁻² mbar.

2.1 Modélisation quadripolaire 1D

Comme dans le cas du plan chaud symétrique, on peut appliquer le formalisme des quadripôles [7] sur le dispositif représenté par la figure 2. On obtient par exploitation de la température de la face avant $T_1(t)$.

Côté échantillon, on obtient :

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \Phi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ C_s p & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_{c1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_e & B_e \\ C_e & D_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi'_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi'_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Avec :

$$C_s = \rho_s c_s e_s$$

$$\begin{bmatrix} A_e & B_e \\ C_e & D_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch(qe) & \frac{sh(qe)}{\lambda q S} \\ \lambda q S sh(qe) & ch(qe) \end{bmatrix} \quad \text{avec } q = \sqrt{\frac{p}{a}} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch(q_i e) & \frac{sh(q_i e)}{\lambda q_i S} \\ \lambda q_i S sh(q_i e) & ch(q_i e) \end{bmatrix} \quad \text{avec } q_i = \sqrt{\frac{p}{a_i}} \quad (3)$$

En développant le produit matriciel précédent, on obtient l'expression de Φ_1 :

$$\Phi_1 = \theta_1 \frac{D}{B} \quad (4)$$

Côté isolant, nous avons :

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi'_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

En développant le produit matriciel précédent, on obtient l'expression de Φ_2 :

$$\Phi_2 = \theta_1 \frac{D_i}{B_i} \quad (6)$$

$$\text{Or : } \Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2 = \frac{\Phi_0}{S} \quad (7)$$

$$\text{Donc : } \Phi_0 = \theta_1 \left(\frac{D}{B} + \frac{D_i}{B_i} \right) \quad (8)$$

Et on en déduit la valeur de θ_1 par la relation :

$$\theta_1 = \frac{\Phi_0}{p} \frac{1}{\left(\frac{D}{B} + \frac{D_i}{B_i} \right)} \quad (9)$$

2.2 Modèle simplifié

Aux temps “longs” ($p \rightarrow 0$), l’expression de la température au centre de la sonde dans l’espace de Laplace (8) devient:

$$\theta_0 \approx \frac{\Phi_0}{p} \frac{1}{(C_s p + E\sqrt{p})(1 - R_{c1}E\sqrt{p}) + (C_s p + E_i\sqrt{p})(1 - R_{c2}E_i\sqrt{p})} \quad (10)$$

Soit encore:

$$\theta_0 \approx \frac{\Phi_0}{p} \frac{1}{(E + E_i)\sqrt{p} + p[C_s - R_{c1}E^2 + C_s - R_{c2}E_i^2]} \quad (11)$$

Puis:

$$\theta_0 \approx \frac{\Phi_0}{p^{3/2}(E + E_i)} \frac{1}{1 - \frac{(2C_s - R_{c1}E^2 - R_{c2}E_i^2)\sqrt{p}}{E + E_i}} \quad (12)$$

Et enfin:

$$\theta_0 \approx \frac{\Phi_0}{p^{3/2}(E + E_i)} \left[1 + \left(\frac{R_{c1}E^2 + R_{c2}E_i^2}{E + E_i} - \frac{2C_s}{E + E_i} \right) \right] \sqrt{p} \quad (13)$$

Et par transformée inverse de Laplace, on obtient:

$$T_0(t) = \Phi_0 \left[\frac{R_{c1}E^2 + R_{c2}E_i^2}{(E + E_i)^2} - \frac{2C_s}{(E + E_i)^2} \right] + \frac{\Phi_0}{(E + E_i)\sqrt{\pi}} \sqrt{t} \quad (14)$$

L’inertie de la sonde et la résistance de contact n’influent pas sur la température aux “temps longs”. La courbe $T_0(t) = f(\sqrt{t})$ devient donc assimilable à une droite au bout d’un certain temps. La détermination de la pente β de cette droite permet d’estimer une première valeur de l’effusivité thermique E par $E + E_i = \frac{\Phi_0}{\beta\sqrt{\pi}}$.

On montre également qu’aux temps “très longs” la courbe $T = f(t)$ est une droite de pente γ et qu’une première valeur de ρc peut quant à elle être obtenue de la façon suivante :

$$(\rho c)_e = \frac{\frac{\phi}{\gamma} - (\rho c)_i e_i - (\rho c)_s e_s}{e_e} \quad (15)$$

L’estimation des paramètres E et ρc est réalisée à l’aide du modèle complet par une minimisation de la somme des écarts quadratiques entre la courbe expérimentale et la courbe modèle [8]. Le calcul itératif est initié à partir des valeurs estimées à partir des modèles simplifiés précédents.

2.3 Méthode d’estimation des propriétés thermiques

L’étude des courbes des sensibilités réduites permet de définir les intervalles sur lesquels on peut réaliser les estimations à partir des modèles simplifiés. Sur l’exemple de la figure 3, on voit que l’on peut utiliser les modèles simplifiés pour estimer l’effusivité E entre 0 et 200s et la capacité thermique volumique ρc à partir de 700 s.

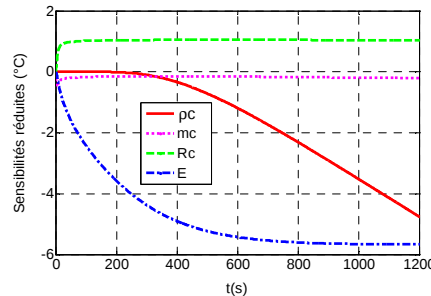


Figure 3: Sensibilités de la température à l’effusivité E et la capacité thermique volumique ρc

La figure 4 représente une courbe expérimentale de la température au centre de l’élément chauffant dans un système d’axe $[T, \sqrt{t}]$ d’une part et dans un système d’axe $[T, t]$ d’autre part. On distingue nettement une partie linéaire entre 25 et 200s sur la première représentation et entre 700 et 800s sur la seconde qui permettent de réaliser une première estimation de respectivement l’effusivité thermique E et de la

capacité thermique volumique ρc . Cette pré-estimation à l'aide des modèles simplifiés conduit aux valeurs suivantes : $E = 1351 \text{ J.m}^{-1}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$ et $\rho c = 1,65.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$.

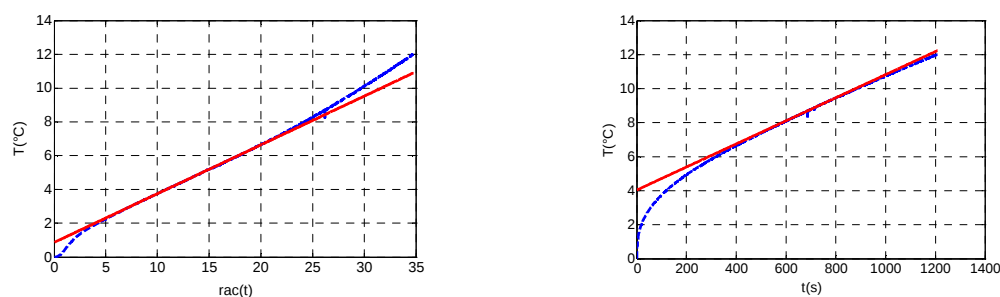


Figure 4 : Courbes $T(\sqrt{t})$ et $T(t)$.

On réalise ensuite une estimation simultanée des paramètres E , ρc , C et R_c à l'aide du modèle complet sur l'ensemble du thermogramme. Les courbes expérimentales et modèles sont représentées sur la figure 5. Les résidus représentés sur la même figure montrent une très bonne concordance entre le modèle et l'expérience mais laissent apparaître un effet 3D qui se produit à partir de 800s.

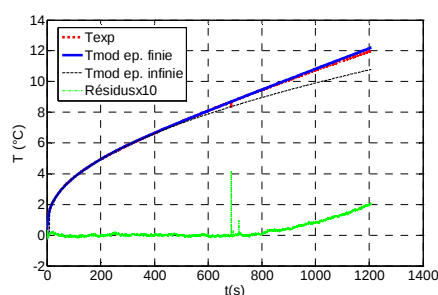


Figure 5 : Courbes expérimentale et théorique et courbes des résidus $\times 10$

Les résultats des deux méthodes d'estimation sont présentés dans le tableau 1. On constate que les deux modèles conduisent pratiquement à des résultats très proches pour cette expérience avec un écart relatif maximal inférieur à 5%.

Tableau 1 : Valeurs estimées avec le modèle complet et le modèle simplifié

Modèle	Modèle complet			Modèle simplifié		
Paramètres	λ	$10^{-6} \rho c$	E	λ	$10^{-6} \rho c$	E
Unités	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\text{J.K}^{-1}.\text{m}^{-3}$	$\text{J.m}^{-1}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\text{J.K}^{-1}.\text{m}^{-3}$	$\text{J.m}^{-1}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$
Valeurs estimées	1,16	1,64	1380	1,11	1,65	1351

3. Résultats et discussions

Une étude expérimentale a permis de mesurer les propriétés thermiques de 5 échantillons de teneur en mil X variant entre 0 et $0,122 \text{ kg}_{\text{mi}}.\text{kg}_{\text{la}}^{-1}$ et pour chacun d'entre eux pour 6 valeurs différentes de la teneur en eau Y . Les résultats sont représentés sur les figures 6 et 7.

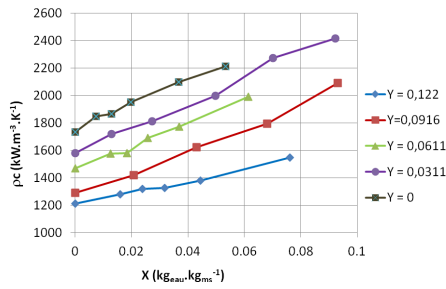


Figure 6 : Capacité thermique volumique ρc en fonction de la teneur en eau X pour différents teneurs en mil Y

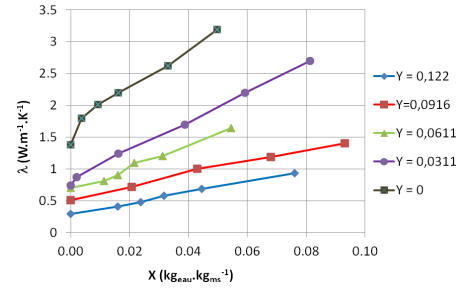


Figure 7 : Conductivité thermique λ en fonction de la teneur en eau X pour différents teneurs en mil Y

4. Conclusion

On constate que la capacité thermique volumique évolue de façon quasi linéaire en fonction de la teneur en eau sur tout le domaine d'étude. La conductivité thermique subit des variations relativement importantes pour des élévations de teneur en eau modérées : la conductivité thermique est multipliée par 2 quand la teneur en eau passe de 0 à 4% en masse. L'ajout de déchets de mil permet de diminuer de manière très significative la conductivité thermique des briques de latérite : la conductivité thermique est divisée par environ 2 si l'on ajoute 6% en masse de déchets de mil par exemple. L'ajout de déchets de mil permet donc une amélioration importante des propriétés isolantes des briques de terre.

Nomenclature

Lettres latines

a	Diffusivité thermique, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
E	Effusivité thermique, $\text{J.m}^{-1}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$
e	Epaisseur, m
p	Variable de Laplace
R_c	Résistance thermique de contact, $\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$
T	Température, K
Cs	Capacité thermique sonde, $\text{J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Symboles grecs

ρc	Capacité thermique volumique, $\text{J.K}^{-1}.\text{m}^{-3}$
Φ	Densité de flux de chaleur, W.m^{-2}
ϕ	Transformée de Laplace du flux de chaleur
λ	Conductivité thermique, $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
θ	Transformée de Laplace de la température

Indices

e	échantillon
i	isolant
s	sonde

Références

- [1] A.Bouguerra, A. Aït-Mokhtar, O. Amiri, MB. Diop. *Measurement of thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity of highly porous building materials using transient plane source technique*, Int. Comm. Heat and Mass Transfer 28 (8) pp.1065-1078, 2001.
- [2] EA. Adam, PJ. Jones *Thermophysical properties of stabilised soil building blocks*. Building and Environment 1995; 30 (2): 245-253.
- [3] P. Meukam, Y. Jannot, A. Noumowe, T.C. Koffane, *Thermo physical characteristics of economical building materials*. Construction and Building Materials Vol 18 pp. 437-443, 2004.
- [4] J. Khedari, P. Watsanasathaporn, J. Hirunlabh, *Development of fibre-based soil-cement block with low thermal conductivity*. Cement and Concrete Composites, 27(1): 111-116, 2005.
- [5] VB. Omubo-Pepple, FE. Opara, C. Ogbonda. *Thermal conductivity of reinforced cement stabilized lateritic brick*. Journal of Engineering and Applied Sciences 2010; 5 (2): 178-180
- [6] H. Bal, Y. Jannot, N. Quenette, A. Chenu and S. Gaye. *Water content dependence of the porosity, density and thermal capacity of laterite based bricks with millet waste additive*. Construction and Building Materials. 31 (2012) 144-150.
- [7] D. Maillat, A. André, J-C. Batsale, A. Degiovanni, C. Moyne. *Thermal quadrupoles*. John Wiley & Sons Ltd, 2000.
- [8] H. Bal, Y. Jannot, S. Gaye and F. Demeurie. *Measurement and modelisation of the thermal conductivity of wet composite porous medium: Laterite based bricks with millet waste additive*. Construction and Building Materials. 41 (2013) 586-593.