

# Etude analytique en régime dynamique des performances thermiques des parois en blocs de terre stabilisée

M'hamed MAHDAD<sup>1</sup>, Aghiles HAMMAS<sup>1</sup>, Said ABBOUDI<sup>2</sup>, Kaci CHALAH<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre National d'études et de Recherches Intégrées du Bâtiments CNERIB, Algérie

<sup>2</sup>ICB UMR 6303, CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, Département COMM, F-90010, Belfort, France

**ABSTRACT** L'objectif visé à travers cette étude est de parvenir à dimensionner de manière optimale les épaisseurs des murs en blocs de terre stabilisée (BTS), pour obtenir un confort thermique satisfaisant à l'intérieur des constructions avec ce matériau. Pour ce faire, une méthode analytique des admittances basée sur le complexe de Fourier est utilisée. L'analyse des résultats a mis en exergue les principaux facteurs influents sur le dimensionnement idoine pour parvenir à assurer un confort thermique satisfaisant à l'intérieur de ces constructions en terre. Parmi ces facteurs, on relève les caractéristiques thermo-physiques intrinsèques des matériaux utilisés et d'autres paramètres tels que le facteur de décrémentation (DF), le décalage temporel (TL), l'admittance (U), la transmittance (Y). Les résultats obtenus ont montré de meilleure performance thermique pour la configuration de mur (W3) ayant une épaisseur de 40 cm, composée de matériau en blocs BTS-3. Par conséquent, des valeurs de 15,49 heures et 0.088 ont été obtenus pour le déphasage thermique (TL) et le coefficient de décrémentation (DF), respectivement.

**Keywords** : blocs de terre BTS, complexe de fourrier, performance thermique, déphasage.

## I. INTRODUCTION

Dans un contexte du développement durable, le recours aux matériaux de construction naturels en Algérie, notamment ceux à base de la terre, fait l'objet d'un regain d'intérêt indéniable. Cependant, les performances des blocs de terre stabilisée en matière d'isolation et d'inertie thermique dans le bâtiment sont théoriquement et expérimentalement encore peu explorées, Neya et al. 2020, Toure et al. 2019. Ainsi à ce jour, le dimensionnement des murs en blocs de terre stabilisée et comprimée (BTS), relève généralement de l'empirisme, du peu d'études scientifiques concernant ce sujet.

Une revue de l'état des connaissances actuelles dans le domaine des transferts de chaleur dans les murs homogènes et composites des constructions en BTS a révélé qu'il n'existe que très peu d'études traitant du sujet analytiquement, Balaji et al. (2019). En effet, il existe de nombreuses bonnes raisons qui plaident pour l'élaboration de solutions analytiques, dont les avantages à long terme sont considérables, comme par exemple la validation de modèles numériques et l'analyse d'interactions complexes des processus physiques, Chaik et al. (2015). A ce titre, quelques travaux

de recherche sur ce sujet ont été menés et ont fait l'objet de quelques publications ces dernières années. Ainsi, dans l'une de ces études, Brima et al. (2015) ont mené une étude comparative sur le confort thermique à l'intérieur de deux logements dont les parois respectives des murs sont en béton et en BTS. L'équation du transfert de la chaleur y a été résolue analytiquement à l'aide des séries de Fourier et numériquement en utilisant la méthode de Cranck-Nicolson. Dans une étude similaire, Nematchoua et al. (2015) se sont intéressés à la détermination de l'épaisseur d'isolation optimale pour des murs externes en blocs de béton et de terre stabilisée. L'optimisation était basée sur un modèle explicite aux différences finies dans des conditions périodiques stables.

De même, El Fgaier et al. 2016 ont investigué à la fois théoriquement avec la méthode des admittances et expérimentalement les paramètres thermiques de trois types de blocs de terre BTS. L'objectif visé consistait à évaluer l'influence des propriétés thermo-physiques, de l'épaisseur, de type de terre utilisée sur les paramètres dynamiques défini en termes de facteur de décrémentation et le déphasage thermique ou de flux thermique. Dans une autre étude rapportée par Balaji et al (2019) portant sur l'examen des paramètres de la performance thermique des enveloppes de parois en terre BTS, deux systèmes de murs, de configurations d'enveloppe de murs homogène et composite ont été évalués en utilisant la méthode analytique des admittances.

A la lumière de ces travaux de recherche, la méthode d'admission est utilisée dans notre étude pour caractériser l'inertie thermique d'un mur homogène en blocs de terre stabilisée (BTS), en tenant compte de la réponse thermique périodique. Il s'agit de la mesure de la capacité thermique des murs en BTS pour stocker et libérer de l'énergie sur un cycle quotidien sur une période de 24 heures. Enfin, l'effet de différents paramètres tels que l'influence de l'épaisseur et l'effet du décalage temporel, du facteur de décrémentation, de l'admission, de la transmission et du facteur de surface sur une période de 24 heures ont été investigués.

## II. MÉTHODOLOGIE

### A. Formulation de la solution analytique

Dans cette recherche, l'équation régissant la conduction thermique transitoire avec les conditions aux limites de convection a été résolue analytiquement à l'aide de la fonction de Fourier. Les détails de cette solution analytique sont présentés ci-après. La présente analyse porte sur la conduction thermique transitoire unidimensionnelle (1D) à travers une paroi avec deux conditions aux limites dépendantes du temps et une condition initiale.

$$\rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad 0 < x < L, \quad t > 0 \quad (1)$$

$\lambda$ ,  $\rho$  et  $C_p$  sont respectivement la conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur spécifique.

Les conditions aux limites associées à l'équation (1) sont :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(0, t) = h_i [T(0, t) - T_i] \quad \text{en } x = 0, \quad t > 0 \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(L, t) = h_o [T_o(t) - T(L, t)] \quad \text{en } x = L \quad t > 0 \quad (3)$$

La condition initiale est donnée comme suit :

$$T(x, 0) = T_0 \quad \text{à } t = 0, \quad 0 \leq x \leq L \quad (4)$$

Où :

$(h_i, T_i)$  et  $(h_o, T_o)$  sont respectivement les coefficients de transfert de chaleur et les températures prenant en compte les effets convectifs et radiatifs respectivement aux surfaces internes et externes du mur (Taneme et al. 2014, Balaji et al. 2019).

La méthode de la transformée dans l'espace complexe est utilisée pour la résolution de l'équation (1) munie des conditions aux limites et initiale (2), (3) et (4). Elle permet de décrire la dépendance dans le domaine imaginaire des températures et des flux thermiques de part et d'autre d'une paroi opaque, L'expression de la température est recherchée sous la forme suivante, (Davies, 2004) :

$$T(x, t) = A. \exp\left(\frac{x}{\xi}\right) \exp\left(\frac{t}{\zeta}\right) \quad (5)$$

$\xi$  et  $\zeta$  représentent respectivement une longueur et un temps caractéristiques du système.

Le schéma de principe de la géométrie du problème est illustré à figure 1.

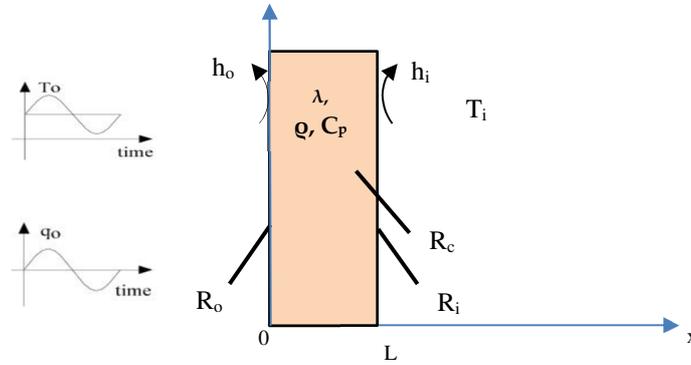


FIGURE 1. Schéma de principe de la géométrie du problème

En introduisant la forme (5) dans l'équation de la chaleur (1), on obtient la relation :  $\xi^2 = \alpha\zeta$ . Où  $\alpha$  est la diffusivité thermique du mur. Pour une paroi soumise à une excitation périodique de période P, on obtient une solution périodique pour la température prenant en compte la relation :

$$\xi^2 = \frac{\alpha P}{2j\pi} \quad \text{avec} \quad j^2 = -1 \quad (6)$$

En imposant des conditions limites sur un mur d'épaisseur finie L, on obtient une solution périodique avec excitation sinusoïdale de période P.

$$\frac{x}{\xi} = \frac{x}{\pm(\alpha P / j 2\pi)^{1/2}} = \pm(i + j) \left( \frac{\pi \rho C_p x^2}{\lambda P} \right)^{1/2} \quad (7)$$

Dans ce cas, on obtient la relation matricielle qui lie les densités de flux et les températures internes et externes (Chaik et al. 2016).

$$\begin{bmatrix} T_{pi} \\ q_{pi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{po} \\ q_{po} \end{bmatrix} \quad (8)$$

La matrice de transfert est définie ci-après :

$$\begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -R_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (A_1 + jA_2) & (A_3 + jA_3)/a \\ a \times (-A_4 + jA_3) & (A_1 + jA_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -R_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Les éléments de la matrice de transfert de l'équation (9) sont calculés comme suit :

$$\begin{aligned} A_1 &= \cosh(z)\cosh(z) \\ A_2 &= \sinh(z)\sinh(z) \\ A_3 &= [\cosh(z)\sinh(z) + \sinh(z)\cosh(z)]/\sqrt{2} \\ A_4 &= [\cosh(z)\sinh(z) - \sinh(z)\cosh(z)]/\sqrt{2} \end{aligned}$$

$T_{pi}$ ,  $q_{pi}$ ,  $T_{po}$  et  $q_{po}$  sont respectivement les températures et les flux thermiques aux deux surfaces interne et externe.  $R_i$  et  $R_0$  représentent les résistances thermiques aux surfaces interne et externe.  $a$  représente le facteur d'admission caractéristique de la paroi, défini par la relation :

$$a = \sqrt{j\omega\lambda\rho C_p} \quad (10)$$

La variable de l'épaisseur cyclique notée  $z$ , s'exprime sous la forme :

$$z = \sqrt{\frac{\pi L^2}{\alpha P}} = \sqrt{\frac{\omega L^2}{2\alpha}} \quad (11)$$

La transmittance thermique  $U$  peut être calculée en utilisant l'équation suivante :

$$U = \frac{1}{R_i + R_c + R_0} \quad (12)$$

Avec :  $R_c = \frac{L}{\lambda}$

L'admittance thermique (transmittance cyclique périodique)  $Y_{12}$  est une grandeur complexe calculée par :

$$Y_{12} = -\frac{1}{E_{12}} \quad (13)$$

Le facteur de décrémentation  $f$  est défini par le rapport du module de transmission thermique périodique sur la transmission thermique stationnaire. Il caractérise l'amortissement d'une sollicitation périodique, est défini par :

$$f_h = \frac{Y_{12}}{U} = -\frac{1}{UE_{12}}; \quad f = |f_h| \quad (14)$$

Le déphasage temporel  $\phi$ , exprimé en (h), est le temps qu'il faut à un flux de chaleur pour traverser la paroi d'un mur. Il est également appelé « délai de décrémentation » et est donné par la relation :

$$\phi = \frac{12}{\pi} \arctan\left(\frac{\text{Im}(f_c)}{\text{Re}(f_c)}\right) = \frac{12}{\pi} \arctan\left(\frac{\text{Im}\left(-\frac{1}{UE_{12}}\right)}{\text{Re}\left(-\frac{1}{UE_{12}}\right)}\right) \quad (15)$$

Un code de calcul développé sous Matlab est utilisé pour calculer les paramètres thermiques dynamiques de parois homogènes de murs en terre (TL, DF, U, Y). Les résultats obtenus ont été réalisés pour une paroi homogène et opaque soumise à une excitation sinusoïdale extérieure de période  $P=24h$  et une température interne  $T_i=25\text{ C}$ . Les propriétés thermo-physiques des blocs BTS ont été obtenues expérimentalement au laboratoire. Les valeurs des résistances thermiques interne  $R_i$  et externe  $R_o$  sont  $R_i = 0.045$  et  $R_o = 0.11\text{ m}^2\text{KW}$ , (Mokhtari et al. 2017). L'effet de l'humidité sur les propriétés thermiques des blocs BTS n'a pas été pris en compte dans les calculs.

### B. Matériaux utilisés et propriétés

Les propriétés thermo-physiques des blocs de terre BTS telles que, la conductivité thermique  $\lambda$  et la capacité calorifique volumique (VHC), ont été calculées au moyen d'un instrument dynamique (Ct-meter), voir figure 2.



FIGURE 2. Appareil de mesure Ct meter

Les blocs BTS ont des dimensions standards de  $29\text{ cm} \times 14\text{ cm} \times 9.5\text{ cm}$ , confectionnés à l'aide de machines semi-automatiques, Mahdad et al. 2018. L'effort de compactage appliqué pour la confection de ces blocs est supérieur à  $7\text{ MPa}$ .

Les paramètres thermiques des échantillons de blocs de terre BTS constituant les parois de murs homogènes sont explicités dans le tableau 1. BTS (1 à 6) désigne les blocs réalisés pour la réalisation des murs de l'enveloppe.

TABLEAU 1. Propriétés thermiques des matériaux BTS, (Mahdad et al. 2018, 2021, 2022, Derradji et al. 2017)

Eléments	Stabilisant (%)	$\lambda$ (W/mK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/kgK)
BTS-1	8 % ciment	1.10	2000	936
BTS-2	5 % ciment	1.30	2002	1320
BTS-3	6 % ciment	0.75	2100	1054
BTS-4	6 % ciment	1.053	2091.2	995
BTS-5	6 % ciment	1.139	2013.65	1016.71
BTS-6	10 % ciment	0.951	1873.9	1135.9

### C. Configuration des parois de murs

Ce travail traite le comportement thermique dynamique des parois enveloppes de murs en blocs de terre BTS utilisés notamment dans le contexte climatique de l'Algérie. Ce type de construction se situe principalement dans la région saharienne du Sud de l'Algérie, qui se caractérise par un climat chaud et aride, (Mahdad et al. 2022).

Donc pour mettre en exergue la performance thermique des blocs BTS en tant que matériau d'enveloppe, six (06) configurations homogènes des structures murales typiques en BTS ont été étudiées. Les murs sont laissés apparents (sans enduits), aussi bien sur les faces intérieures qu'à l'extérieures, figure 3.

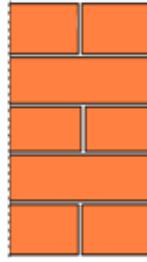


FIGURE 3. Configuration des parois de murs en BTS étudiés.

### III. ANALYSES DES RESULTATS

#### A. Facteur de décrémentation et déphasage thermique des parois en BTS

Les tableaux 2 et 3, récapitulent l'effet de la variation de l'épaisseur des parois homogènes en blocs BTS sur le facteur de décrémentation (DF) et son décalage temporel (TL). W désigne le type de la paroi de mur homogène en BTS.

TABLEAU 2. Facteur de décrémentation DF des parois homogènes

Epais (m)	W1	W2	W3	W4	W5	W6
0,2	0,5201	0,4279	0,4004	0,4891	0,5095	0,4614
0,3	0,2895	0,2227	0,1848	0,2626	0,282	0,2373
0,4	0,1559	0,1124	0,081	0,1361	0,1512	0,1172

TABLEAU 3. Déphasage temporel TL des parois homogènes

Epais (m)	W1 (h)	W2 (h)	W3 (h)	W4 (h)	W5 (h)	W6 (h)
0,2	5,8196	6,7692	7,5867	6,3402	6,0802	6,7043
0,3	8,8405	10,049	11,536	9,5804	9,1744	10,148
0,4	11,824	13,321	15,498	12,809	12,255	13,592

Les résultats obtenus indiquent une diminution du facteur de décrémentation du mur et une augmentation du déphasage temporel à mesure que son épaisseur augmente. Ce phénomène entraîne un décalage de phase dans la distribution de température des espaces intérieurs et extérieurs.

Par ailleurs, le déphasage dans le temps diminue à mesure que la conductivité thermique des matériaux augmente (cas du mur W3 et W6). Ainsi, il a été relevé que le décalage temporel présente une évolution inversement proportionnelle avec la conductivité et la diffusivité thermique du matériau de construction en terre BTS (murs W3, W6).

De plus, on remarque qu'avec un mur en terre de 40 cm d'épaisseur, le matériau de bloc de terre (BTS-3) a donné une meilleure performance thermique avec un facteur de décrémentation le plus faible (0,081) et un décalage le plus élevé (15,49 heures) comparé aux six matériaux étudiés. Pour le

mur W3, le facteur de décrémentation obtenu est de l'ordre de (0,40) pour une épaisseur de 20 cm d'épaisseur, avec un décalage dans le temps de 7, 58 heures. Ainsi, pour le mur W3, une épaisseur de 30 cm, semble donc être la mieux adaptée pour avoir un bon confort thermique et ce, avec un facteur d'amortissement faible (0.18). Dans ce cas, on relève un déphasage convenable de la vague de chaleur dans le temps avec une atténuation thermique de 11,53 heures.

#### B. Admittance et transmittance thermique des parois en BTS

Les tableaux 4 et 5 donnent les valeurs des transmittances et des admittances thermiques, pour deux épaisseurs (0,20 et 0,40 m) d'enveloppes de matériaux homogènes en blocs de terre BTS.

**TABLEAU 4. Transmittance thermique U (W/m<sup>2</sup>K) des parois en BTS**

Epais (m)	W1	W2	W3	W4	W5	W6
0,20	2,84	3,08	2,29	2,77	2,89	2,62
0,40	1,87	2,09	1,42	1,81	1,91	1,69

**TABLEAU 5. Admittance thermique Y(W/m<sup>2</sup>K) des parois en BTS**

Epais (m)	W1	W2	W3	W4	W5	W6
0,20	5,11	5,55	4,90	5,14	5,18	5,08
0,40	5,13	5,54	4,88	5,14	5,20	5,07

L'analyse des résultats a fait ressortir une nette différence entre l'évolution de ces deux paramètres dynamiques, en l'occurrence l'admittance thermique Y et la transmission thermique U. Les valeurs de l'admittance thermique se stabilisent et ce, pour toutes les configurations de murs homogènes étudiées, alors que celles de la transmittance dépendent à la fois de l'épaisseur et de la résistance thermique totale des murs.

La paroi W-3 en bloc de terre (BTS-3) présente les valeurs de transmission thermique les plus basses et ce, pour toutes les épaisseurs de brique parmi les six matériaux BTS étudiés, suivi de la paroi homogène W-6 en bloc de terre stabilisé (BTS-6). Elles représentent donc les meilleures configurations des matériaux étudiés. En effet, dans le cas de la paroi (W3), en faisant varier son épaisseur de 20 à 40 cm, son admittance varie de 4.90 à 4.88 W/m<sup>2</sup>K. Hall et al. 2008 ont rapporté des conclusions semblables dans leurs travaux concernant l'étude des performances thermiques des parois en terre avec la méthode des admittances. En effet, sur des parois homogènes en terre (stabilisée avec 6 % de ciment) avec une paroi d'une épaisseur de 40 cm, il est obtenu une admittance de 4.7 à 5.7 W/m<sup>2</sup>K avec une transmittance thermique variant de 1.26 à 2.30 W/m<sup>2</sup>K.

#### IV. CONCLUSION

La présente recherche traite une étude analytique par la méthode des admittances du transfert de chaleur à travers des parois verticales opaques représentées par les murs enveloppes d'une bâtisse réalisée avec des blocs en terre stabilisée (BTS), dans le contexte climatique du Nord de l'Algérie. Pour ce faire, il a été utilisé six (06) différents types de blocs de terre stabilisée BTS (BTS 1 à 6), qui composent les parois extérieures de murs homogènes (W 1 à W6). Les conclusions observées ont révélé que les propriétés thermo-physiques intrinsèques du matériau (conductivité, capacité thermique, masse volumique) et l'épaisseur de la paroi de l'enveloppe ont une influence évidente

sur les performances thermiques du mur enveloppe en terre. Les valeurs du facteur de décrémentation et du décalage temporel dépendent également de l'épaisseur de la paroi en BTS.

Parmi les six configurations de parois de murs homogènes en blocs de BTS étudiées (W1 à W6), c'est le mur W3 qui a donné les meilleures performances thermiques, caractérisées avec un facteur de décrémentation le plus faible et un délai de déphasage le plus élevé. Le mur W1 est celui qui a montré les plus faibles performances thermiques, et a présenté un décalage temporel le plus faible. Les autres murs (W6, W2, W5 et W4) ont des temps de déphasages intermédiaires.

## REFERENCES

Balaji, N. C., Mani, M., Venkatarama Reddy, N.C. Dynamic thermal performance of conventional and alternative building wall envelopes. *Journal of Building Engineering*. Volume 21, January 2019, Pages 373-395.

Brima, A, Serir, L, Mesmoudi, K and Guettala, S. A study on the thermal comfort inside a flat under arid climate zone in Algeria. *Revue des Energ. Renouvel*. Vol. 18 N°2 (2015) 199 – 208.

Derradji, L, Imessad, K, Amara, M, Boudali, F. A study on residential energy requirement and the effect of the glazing on the optimum insulation thickness. *Applied Thermal Engineering* 112 (2017) 975–985.

El Fgaier, F., Lafhaj, Z., Antczak, E., Chapiseau, C. Dynamic thermal performance of three types of unfired earth bricks. *Applied Thermal Engineering*. Volume 93, 25 January 2016, Pages 377-383.

Hall, M.R., Lindsay R., Krayenhoff M., *Modern earth buildings: Materials, engineering, constructions and applications*, Elsevier, 2012.

Mahdad M, Benidir A, Brara A. Hydro-mechanical properties and durability of earth blocks: influence of different stabilisers and compaction levels. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 2018 Vol.9, Issue 2.

Mahdad M., Benidir A., Brara A. Experimental assessment of mechanical behavior of a compressed stabilized earth blocks (CSEB) and walls. *Journal of Materials and Engineering Structures*. Vol 8, n°01, 2021.

Mahdad M., Benidir A., Brara, A. Vieillissement des constructions en blocs de terre stabilisée ageing of stabilized earth block constructions. *Journal Algérie Equipement* Janvier 2022, N° 66 : 52-59.

Mokhtari F., Loukarfi L., Chikhi M., Imessad K., Ait Messaoudene N., A passive wall design to minimise building temperature swings for Algerian Saharan climate. *Science And Technology For The Built Environment*. 23 :7, 1142-1150. 2017.

Nematchoua, M, K, Raminosa, C, Mamiharijaona, R, René, T, Orosa, J, Watis, E, Meukam, P. Study of the economical and optimum thermal insulation thickness for buildings in a wet and hot tropical climate: Case of Cameroon. *Renew. and Sust. Energy* 50(2015), 1192–1202.

Neya. I, Yamegueu. D, Coulibaly. Y, Messan. A, Sountong-Noma Ouedraogo. A. L. Impact of insulation and wall thickness in compressed earth buildings in hot and dry tropical regions. *Journal of Building Engineering*. Volume 33, January 2021, 101612.

Saboor S, Ashok B P., Setty T. Optimizing the position of insulating materials in flat roofs exposed to sunshine to gain minimum heat into buildings under periodic heat transfer conditions. *Environmental Science and Pollution research* volume 23, pages 9334-9344(2015).

Saboor. S., Ashok. B., Setty. T. Influence of ambient air relative humidity and temperature on thermal properties and unsteady thermal response characteristics of laterite wall houses. *Building and Environment* Volume 99, April 2016, Pages 170-183.

Taneme. Y., Abboudi. S., Bougriou. C. Numerical and Economical Study of Thermal Insulation in Multi-layer Wall Exposed to Real Climatic Conditions. *Athens Journal of Technology Engineering*. June 2014.

Toure. P. M, Dieye. Y, Gueye. P. M, Faye. M and Sambou. V. Influence of envelope thickness and solar absorptivity of a test cell on time lag and decrement factor. *Journal of Building Physics*. Vol 43, Issue 4, 2020.

.