

Amélioration du confort thermique des bâtiments par utilisation de l'inertie thermique des composites argile-paille de chiendent

Improvement of the thermal comfort of buildings by using the thermal inertia of quackgrass-clay composites

Gratien KIKI^{1,2*}, Aristide HOUNGAN¹, Clément KOUCHADE¹, Armand DJOSSOU¹
Philippe ANDRE², Antoine VIANOU¹

¹Laboratoire de Caractérisation Thermo-physique des Matériaux et d'Appropriation Energétique (Labo-CTMAE) de l'Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI), 01 BP 2009 Cotonou, Benin

²Equipe de recherche 'Building Energy Monitoring and Simulation (BEMS)' du Campus d'Arlon de l'Université de Liège, 6700 Arlon-Belgique

Email* : kiki GRATIEN@yahoo.fr

Résumé – L'importante consommation énergétique des bâtiments se justifie par l'usage des systèmes CVC pour assurer le confort thermique des occupants. Une mesure passive d'amélioration de l'efficacité énergétique dans ce secteur est l'utilisation du composite argile-paille de chiendent dans l'enveloppe des bâtiments. L'incorporation de 4% de paille de chiendent dans des briques d'argile comprimée diminue leur conductivité thermique de 30% et leur effusivité de 11%. A travers des simulations sur un bâtiment en région tropicale, l'inertie thermique de ce composite permet un déphasage de flux de chaleur de plus de 6h et une amélioration de la température intérieure d'environ 2°C.

Mots clés : argile – paille de chiendent, inertie thermique, confort thermique, efficacité énergétique.

Abstract – The high energy consumption of buildings is justified by the use of HVAC systems to ensure the thermal comfort of the occupants. A passive measure to improve energy efficiency in this sector is the use of composite material clay-quackgrass in the building envelope. Incorporating 4% quackgrass straw into compressed clay bricks reduces their thermal conductivity by 30% and their effusivity by 11%. Through simulations on a building in a tropical region, the thermal inertia of this composite allows a phase shift of more than 6 hours of heat flow and an improvement of about 2°C in the interior temperature.

Keywords: clay - quackgrass straw, thermal inertia, thermal comfort, energy efficiency.

Nomenclature

a	diffusivité, m^2/s	X, Y	admittances thermiques, $W/K.m^2$
c	chaleur spécifique, $J/kg.K$	Z_n	élément de la matrice de transfert thermique
e	épaisseur, m	Symboles grecs	
E	effusivité thermique, $W.s^{1/2}/K.m^2$	λ	conductivité thermique, $W/m.K$
I_n	incertitude de mesure	η	amortissement
i	unité imaginaire, $i^2 = -1$	ρ	masse volumique, kg/m^3
L	longueur, m	$\bar{\theta}$	température moyenne, K
m	masse, kg	$\tilde{\varphi}_e$	densités moyennes de flux de chaleur, W/m^2
P	période, h	ω	fréquence angulaire, rad/h
R	résistance thermique, $m^2.K/W$	Φ	déphasage, h
R_c	résistance thermique de contact, K/W	\emptyset	flux de chaleur, W
r_0	rayon, m	γ	constante d'Euler ($\gamma = 0,57721$)
S	Surface, m^2	α	coefficient directeur de la droite de régression de l'effusivité
T	température, °C	β	coefficient directeur de la droite de régression de la conductivité thermique
t	temps, s		
U	coefficient de transmission thermique, $W/K.m^2$		

1. Introduction

Le réchauffement climatique de la planète est la conséquence directe des quantités énormes de gaz à effet de serre (GES) qui sont émises chaque jour dans l'atmosphère. D'après des données internationales publiées en 2016, la consommation mondiale actuelle d'énergie dans le secteur des bâtiments est d'environ 25% avec un taux de croissance annuelle le plus élevé, estimé à 1,5% [1]. A. Allouih et al. affirment, après un état des lieux sur la consommation énergétique des bâtiments, que la part la plus importante de la demande énergétique dans ce secteur peut être attribuée aux systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) [2]. En nous référant au rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), une des solutions pour le maintien du réchauffement en dessous de la barre de 1,5°C à l'horizon 2050 est la réduction de moitié, voir de trois quarts de la demande de fonctionnement des bâtiments [3].

Contrairement aux systèmes CVC qui nécessitent de l'énergie pour assurer le confort thermique dans les bâtiments, l'inertie thermique est un moyen passif d'amélioration de ce confort. Elle traduit l'aptitude d'un bâtiment à s'opposer à la transmission des gains solaires à l'ambiance intérieure. Sa prise en compte dans la conception ou la rénovation des bâtiments permet, non seulement l'amélioration du confort thermique, mais aussi la réduction de la consommation énergétique. Elle représente donc un frein au réchauffement climatique et un moyen efficace de rétablissement de la justice énergétique à travers le monde. Une utilisation optimale de l'inertie thermique dépend principalement des caractéristiques thermiques des matériaux composant l'enveloppe du bâtiment considéré. Ainsi, dans l'optique de disposer d'un matériau écologique et présentant des caractéristiques thermiques adéquates pour une bonne inertie thermique, un nouveau composite argile – paille de chiendent a été élaboré. Ce travail, qui représente le premier sur le composite argile – paille de chiendent, vise à étudier l'influence de l'inertie thermique de ce matériau sur le confort thermique et la consommation énergétique d'un bâtiment en région tropicale.

2. Inertie thermique et paramètres associés

Plusieurs définitions ont été données dans la littérature pour décrire l'inertie thermique d'un matériau [4], [5], [6]. A défaut d'une définition standard et commune à tous, l'inertie thermique d'un matériau peut être définie comme étant sa capacité à stocker de l'énergie et à la restituer après un certain temps. Elle dépend principalement de la capacité thermique (ρc) et de la conductivité thermique (λ) des parois. Ces paramètres permettent de déterminer l'effusivité et la diffusivité thermique des parois. En effet, l'effusivité thermique d'un matériau exprime sa capacité à absorber plus ou moins rapidement de l'énergie sans toutefois s'échauffer en surface. Exprimée en $W \cdot s^{1/2} / (K \cdot m^2)$, elle est déterminée par l'équation (1) :

$$E = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (1)$$

La diffusivité thermique quant à elle représente la vitesse à laquelle la chaleur se propage au sein d'un matériau. Elle s'exprime en $m^2 \cdot s^{-1}$ et se calcule par la relation (2).

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (2)$$

L'inertie thermique d'un bâtiment peut être déterminée par la méthode des admittances. Cette méthode, basée sur les nombres complexes, permet de déterminer la capacité d'un composant du bâtiment à stocker et à restituer de l'énergie sur une période de 24h par exemple [7]. Elle peut être estimée sur la base de la matrice (3) :

$$\begin{bmatrix} \tilde{\theta}_e \\ \tilde{\varphi}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 \\ Z_3 & Z_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_s \\ \tilde{\varphi}_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Z_1 = Z_4 = \cosh\left(e\sqrt{\frac{i\omega}{a}}\right); Z_2 = \frac{1}{E\sqrt{i\omega}} \sinh\left(e\sqrt{\frac{i\omega}{a}}\right); Z_3 = E\sqrt{i\omega} \sinh\left(e\sqrt{\frac{i\omega}{a}}\right).$$

Où $\tilde{\theta}_e$ et $\tilde{\theta}_s$ représentent les températures moyennes d'entrée et de sortie en K ; $\tilde{\varphi}_e$ et $\tilde{\varphi}_s$ les densités moyennes de flux de chaleur reçue et transmise en $W.m^{-2}$; Z_1 à Z_4 les éléments de la matrice de transfert ; ω la fréquence angulaire en $rad.s^{-1}$; e l'épaisseur de paroi en m .

En pratique, pour des raisons de simplicité, il est conseillé d'utiliser les températures d'air intérieur et extérieur au lieu des températures de surfaces des parois [8]. Dans ce cas, il est nécessaire de prendre en compte les résistances thermiques des films d'air au niveau des surfaces. Ainsi, la matrice de transmission d'une paroi multicouche est déterminée grâce à la relation (4) :

$$\begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 \\ Z_3 & Z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \prod_{k=1}^n \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 \\ Z_3 & Z_4 \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} 1 & R_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Principalement, deux paramètres permettent de quantifier l'inertie thermique d'un bâtiment : l'admittance thermique et le facteur de décrémentation [8]. L'admittance thermique exprime la capacité d'un élément de construction à stocker et à libérer de l'énergie au cours du cycle quotidien. Elle peut être définie comme étant le rapport de la variation du flux de chaleur à la variation de température pendant un cycle de $24h$ [6]. Quant au facteur de décrémentation, encore appelé amortissement, il s'agit du rapport entre l'amplitude de la variation du flux de chaleur transmis à l'intérieur du bâti à travers les parois et celle pénétrant dans ces dernières. Les équations (5) et (6) permettent de déterminer respectivement les admittances thermiques et le facteur de décrémentation d'une paroi [7].

$$X = \frac{Z_4}{Z_2}; Y = \frac{Z_3}{Z_2} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{1}{|Z_2|U} \quad (6)$$

Où X, Y sont les admittances en $W/K.m^2$ des faces extérieure et intérieure d'une paroi et U le coefficient de transmission thermique en $W/K.m^2$.

Le facteur de décrémentation est le plus souvent associé au décalage temporel observé lors de la transmission du flux de chaleur amorti au milieu intérieur (figure 1). Ce décalage (Φ), encore appelé déphasage et exprimé en *heure* (h), est déterminé par l'équation (7).

$$\Phi = 0.2821 \times P \times \sqrt{\frac{e^2}{P \times a}} \quad (7)$$

Où P est la période ($P = 24h$), e est l'épaisseur de la paroi en m et a est la diffusivité en m^2/h .

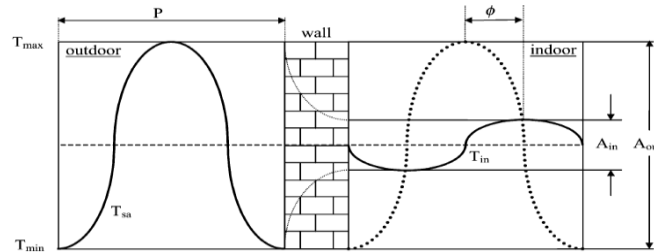


Figure 1 : Représentation schématique du déphasage et de l'amortissement d'une onde de chaleur [5]

3. Matériels et méthodes

3.1. Réalisation des échantillons

Les échantillons utilisés dans ce travail ont été fabriqués à base d'argile et de paille de chiendent. L'*argile* est une roche sédimentaire meuble, constituée d'un ensemble de particules

fines (de diamètre inférieur à $2 \mu m$) largement utilisée en construction depuis des temps anciens et dont l'usage est toujours d'actualité [9]. Quant au *chiendent*, il s'agit d'une mauvaise herbe vivace et envahissante de la famille des graminées qui pousse sur les sols cultivables. De son nom scientifique « *Elytrigia repens* », le chiendent se reconnaît par ses longues feuilles à nervures fines plus ou moins planes, de couleur verte glauque et par ses tiges souterraines blanchâtres ou jaunâtres de 1,5 à 4 mm de diamètre appelées rhizomes [10]. Son utilisation en tant que matériau biosourcé dans de l'argile représente un moyen de valorisation de cette herbe souvent éliminée avec de l'herbicide. Le chiendent utilisé a été recueilli sur le site de fabrication des échantillons à l'Université d'Abomey-Calavi.

Pour réaliser les échantillons, l'argile, prélevée dans la carrière de Zogbodomey au sud du Bénin, a été mélangée à de la paille de chiendent séchée et broyée. Des éprouvettes de $30 \times 35 \times 50 \text{ mm}^3$ ont été réalisées en fonction de différents teneurs en paille de chiendent dont la taille des particules est comprise entre $[0.25\text{mm} ; 0.63\text{mm}]$. Un malaxage à sec du mélange a été effectué avant l'ajout d'eau. Les caractéristiques des matériaux en terre étant beaucoup plus influencées par la teneur en eau, la détermination de la quantité optimale d'eau à utiliser s'est avérée nécessaire. Pour les matériaux en terre, cette quantité est souvent déterminée par l'essai Proctor selon la norme NF P 94-093, intitulée « Détermination des références de compactage d'un matériau ». Malheureusement cet essai n'est pas adapté aux matériaux en argile puisqu'il provoque une hétérogénéisation de la masse de l'échantillon [11]. B. Laibi, recommande une teneur en eau optimale comprise entre 10 et 12% pour la réalisation des briques en argile comprimée [12]. Une teneur en eau de 12% a donc été retenue pour la confection des échantillons en argile simple. En ce qui concerne les matériaux contenant de la paille de chiendent, des teneurs en eau allant de 12 à 14% ont été utilisées en fonction du pourcentage de chiendent incorporé. Une stabilisation mécanique par compactage à la presse sous une charge de 4 MPa a été appliquée au mélange afin d'assurer aux échantillons, une bonne résistance à la compression et une meilleure tenue à l'eau. Les échantillons ainsi réalisés ont par la suite été séchés à l'air libre et à l'abri du soleil jusqu'à la stabilisation totale de leur masse.



Figure 2 : Etapes de fabrication des échantillons

3.2. Méthode de caractérisation thermique des matériaux

L'analyse des matériaux de construction et la détermination de leurs propriétés thermo-physiques représente une étape très importante dans la conception et/ou la rénovation d'un bâtiment [11]. Ainsi, la conductivité et l'effusivité thermiques des échantillons réalisés ont été déterminées par la méthode du ruban chaud symétrique.

Le ruban chaud symétrique est une méthode de caractérisation thermique des matériaux en régime transitoire mise en œuvre par Bruno LADEVIE [13]. Son principe consiste à envoyer un flux de chaleur à travers deux échantillons identiques par l'intermédiaire d'une résistance

chauffante de forme rectangulaire, de très faible épaisseur et comportant un thermocouple sur son axe médiant. A l'instant initial, les échantillons sont en équilibre thermique avec le milieu. Une tension électrique est imposée à la résistance chauffante placée entre les deux échantillons. Le contact est supposé parfait (figure 3). Les dimensions des échantillons sont choisies de sorte que le flux envoyé à travers les échantillons n'atteigne pas les faces opposées à la résistance chauffante (hypothèse du milieu semi-infini). On considère le transfert de chaleur unidirectionnel. L'évolution de la température est enregistrée pendant un temps relativement court (180 secondes).

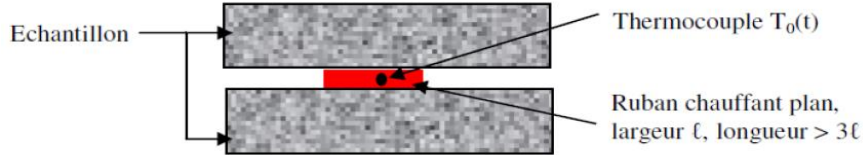


Figure 3 : Schéma de principe de la méthode du ruban chaud symétrique [14]

Les premières valeurs du thermogramme ainsi obtenu permettent de déterminer l'effusivité thermique du matériau grâce au modèle thermique du plan chaud. En négligeant les premières valeurs, à cause de l'influence de l'inertie de la sonde, le tracé de la courbe expérimentale $T_0(t) - T_0(0)$ en fonction de \sqrt{t} sur un intervalle $[0 ; 50]$ peut être représenté par l'équation suivante [14], [15] :

$$T_0(t) - T_0(0) \approx \frac{2\phi}{ES\sqrt{\pi}}\sqrt{t} + \phi \left[R_c - \frac{mc}{(ES)^2} \right] \quad (8)$$

L'effusivité thermique est alors déterminée par la régression linéaire de la courbe expérimentale. A partir de la pente (α) de la droite de régression, l'effusivité thermique est calculée par l'expression :

$$E = \frac{2\phi}{\alpha S\sqrt{\pi}} \quad (9)$$

Où ϕ est le flux de chaleur en W et S la surface de la résistance en m^2 .

L'estimation de la température $T_s(t)$ aux temps longs se fait grâce à l'expression [14], [15] :

$$T_s(t) - T_s(0) \approx \frac{\phi}{4\pi\lambda L} \ln(t) + \phi \left[R_c - \frac{\ln \frac{r_0}{\sqrt{a}}}{2\pi\lambda L} + \frac{\gamma}{4\pi\lambda L} \right] \quad (10)$$

Où γ est la constante d'Euler ($\gamma = 0,57721$).

Le tracé de $T_s(t) - T_s(0)$ en fonction de $\ln(t)$ donne une courbe assimilable à la une droite et dont la régression linéaire de pente $\beta = \frac{\phi}{4\pi\lambda L}$ permet de déterminer la conductivité thermique du matériau.

$$\lambda = \frac{\phi}{4\pi\beta L} \quad (11)$$

4. Résultats et discussion

4.1. Caractéristiques thermiques des matériaux

Comme énoncé plus haut, la méthode du ruban chaud permet de déterminer deux propriétés thermiques du matériau que sont : la conductivité thermique et l'effusivité thermique. Cinq types de briques d'argile contenant différentes proportions de chiendent ont été caractérisés. On distingue l'argile avec une teneur en chiendent de : 0% (BTC0), 1% (BTC1), 2% (BTC2), 3% (BTC3), 4% (BTC4). Une série de trois mesures a été effectuée sur chaque type de composite. Les résultats et les incertitudes de mesure (I_n) obtenus sont consignés dans les tableaux ci-

dessous. L'incertitude (I_n) est celle de type A estimée suivant le Guide des incertitudes de mesure (GUM) [16].

Echantillon	Chiendent (%)	ρ ($kg.m^{-3}$)	λ_1	λ_2	λ_3	λ_{moy} ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	I_n (%)
BTC0	0	1664	0.81	0.98	0.87	0,89	5.61
BTC1	1	1572	0.85	0.85	0.77	0.82	3.24
BTC2	2	1534	0.79	0.67	0.77	0.74	4.99
BTC3	3	1509	0.71	0.66	0.59	0,65	5.33
BTC4	4	1492	0.56	0.70	0.61	0,62	6.57

Tableau 1 : Conductivité thermique des échantillons étudiés

Echantillon	Chiendent (%)	E_1	E_2	E_3	E_{moy} ($W.K^{-1}.m^{-2}.s^{1/2}$)	I_n (%)
BTC0	0	1743.8	2021.53	1882.89	1882.74	4.26
BTC1	1	1826.91	1918.62	1852.86	1866.13	1.46
BTC2	2	1921.8	1694.26	1876.64	1830.90	3.80
BTC3	3	1669.2	1829.78	1742.06	1747,01	2.66
BTC4	4	1596.86	1684.87	1727.45	1669.72	1.65

Tableau 2 : Effusivité thermique des échantillons étudiés

Les figures 4 et 5 illustrent l'évolution de la conductivité et de l'effusivité thermiques des matériaux en fonction de la teneur en paille de chiendent.

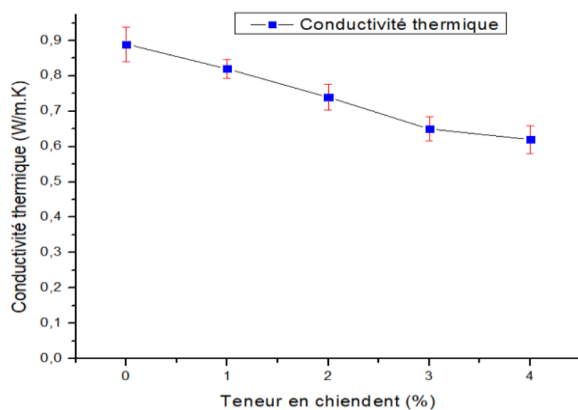


Figure 4 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en chiendent

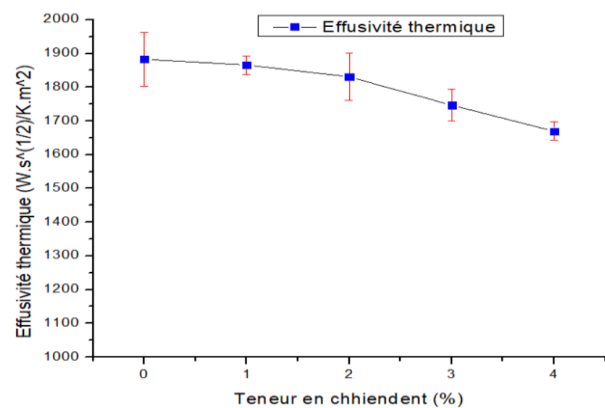


Figure 5 : Evolution de l'effusivité thermique en fonction de la teneur en chiendent

Les résultats obtenus après caractérisation des échantillons montrent une diminution de la conductivité thermique et de l'effusivité des matériaux au fur et à mesure que la teneur en paille de chiendent augmente (figures 4 et 5). Des réductions de 30% et 11% ont respectivement été observées pour la conductivité et l'effusivité thermiques lorsque la proportion de chiendent passe de 0 à 4%. Cela a pour avantage de limiter la propagation de la chaleur au sein du matériau et de transmettre à l'ambiance intérieure, un flux de chaleur plus amorti après un temps plus long. D'ailleurs, le calcul des déphasages des différents types de matériaux (pour $e = 20cm$) donne des valeurs comprises entre 9,74h pour le BTC0 et 12,47h pour le BTC4. Ces valeurs ont été confirmées par des simulations sur une zone de bâtiment dont l'enveloppe se compose uniquement des matériaux fabriqués. Des déphasages 9,5h à 13h ont été obtenus.

4.2. Simulation thermique

Pour évaluer les performances du composite argile – paille de chiendent face aux sollicitations thermiques extérieures, il était nécessaire de disposer d'un bâtiment existant dont

les performances actuelles seront comparées à celles qui auraient été obtenues avec le nouveau matériau. Ainsi, un bâtiment de bureau a été retenu dans la ville de Cotonou au sud du Bénin. Deux bureaux ont été choisis pour des simulations thermiques sous TRNSYS. Les bureaux, orientés vers le sud, sont construits en briques de mortier de ciment entièrement carrelés à l'extérieur. L'épaisseur des murs est de 20cm. Les fenêtres, en simple vitrage, occupent 30% de l'enveloppe des bureaux. Le toit en béton a une épaisseur de 25cm.

Dans un premier temps, les bureaux ont été modélisés en 3D dans Google SketchUp puis dans TRNBuilt avec les matériaux de base utilisés pour leur construction. Ensuite, l'enveloppe de bureaux (murs et toit) en matériaux conventionnels a été tour à tour remplacée par le BTC4. Les températures résultantes (opératives) des locaux ont ensuite été simulées sur le mois le plus chaud de l'année (Février). Les figures 4 et 5 ci-dessous traduisent les variations des températures intérieures des locaux. Pour une meilleure lecture des figures, seules les variations sur les deux dernières semaines du mois de Février ont été présentées.

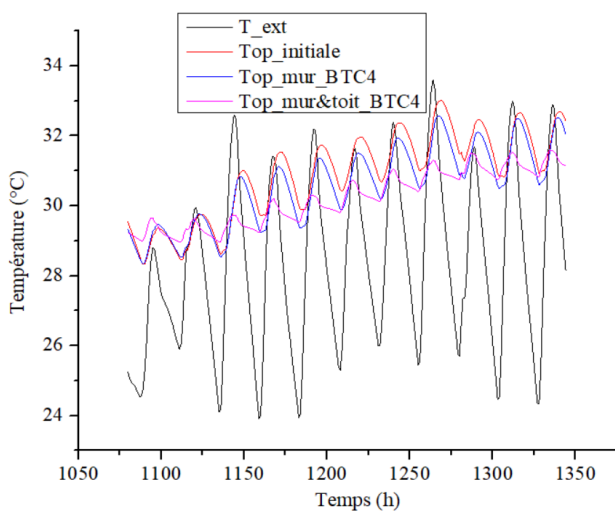


Figure 6 : Résultat des simulations de la température résultante dans le premier bureau considéré

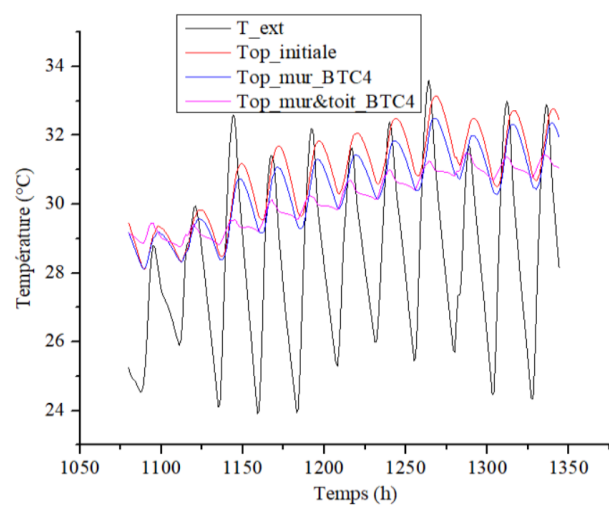


Figure 7 : Résultat des simulations de la température résultante dans le second bureau considéré

Il ressort de l'analyse de la figure 5 que la température moyenne du premier bureau chute de 0,65°C lorsque les murs sont remplacés par 20cm de BTC4. La température moyenne passe ainsi donc de 29,72°C (T_{op_ini}) à 29,07°C ($T_{op_M_BTC4}$). Cette faible variation de température peut s'expliquer par les apports importants de chaleur à travers le toit et les fenêtres. Pour confirmer cette hypothèse, les matériaux initiaux composant le toit ont alors été remplacés par 25cm de BTC4. La température moyenne enregistrée dans ce cas est de 28,32°C ($T_{op_MT_BTC4}$) soit une baisse de 1,40°C. Cette nouvelle température se rapproche de la température de confort obtenue avec des climatiseurs (27,29°C). En effet, une campagne de surveillance de la température et de l'humidité des bureaux suivi d'une enquête de confort ont été réalisées dans le bâtiment. La température de confort (estimée uniquement sur la base des résultats de l'enquête de confort réalisée auprès des occupants) obtenue grâce aux climatiseurs est de 27,29°C contre une température de 29,20°C lorsque les climatiseurs sont à l'arrêt (température moyenne enregistrée en journée pendant les week-ends). Les climatiseurs assurent donc le confort des occupants en baissant de 1,91°C la température de l'ambiance. En prenant en compte les incertitudes de mesure des tableaux 1 et 2, la chute de température, lorsque les murs sont remplacés par le BTC4, se fait dans un intervalle de [0,57°C ; 0,72°C]. Elle varie entre [1,27°C ; 1,51°C] lorsque les murs et le toit sont remplacés par le BTC4.

Des résultats similaires ont été obtenus dans le second bureau (figure 6). On note entre autres, des diminutions de 0,62°C lorsque les murs sont en BTC4 et de 1,25°C lorsque les murs et le toit sont en BTC4. Même s'il est vrai que les gains thermiques dus aux équipements et aux

occupants n'ont pas été pris en compte lors des estimations, nous pouvons tout de même affirmer que l'utilisation du BTC4 dans l'enveloppe du bâtiment réduirait de plus de moitié la charge de climatisation.

5. Conclusion

A l'issue de cette étude, le composite argile – paille de chiendent se présente comme une solution écologique efficace pour l'amélioration du confort thermique dans les bâtiments. Même si les résultats actuels ne le placent pas comme un substituant définitif des systèmes de climatisation, sa présence dans l'enveloppe des bâtiments limite considérablement l'utilisation de ces systèmes. Il contribue donc à la réduction de la consommation énergétique des bâtiments. Toutefois, des études complémentaires de caractérisation hydrique et mécanique doivent être menées afin d'évaluer la durabilité du matériau.

Références

- [1] L. E. Singer and D. Peterson, *International energy outlook 2016*, Washington, Agence Statistique et Analytique du Département de l'Energie des États-Unis (2011).
- [2] A. Allouhi, Y. El Fouih, T. Kousksou, A. Jamil, Y. Zeraoui, and Y. Mourad, Energy consumption and efficiency in buildings: Current status and future trends, *J. Clean. Prod.*, 109 (2015), 118-130.
- [3] GIEC, *Global Warming of 1,5°C*, Incheon (2018).
- [4] S. Verbeke and A. Audenaert, Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 82 (2018), 2300-2318.
- [5] K. Ulgen, Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor, *Energy Build.*, 34 (2002), 273-278.
- [6] S. V. G. Goulart, Thermal Inertia and Natural Ventilation – Optimisation of thermal storage as a cooling technique for residential building in Southern Brazil, Thèse de l'Architectural Association School de Londres, 2004.
- [7] L. Chahwane, Valorisation de l' inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments, Thèse de l'Université de Grenoble, 2012.
- [8] L. Marletta, G. Evola, M.Giuga, F.Sicurella, The admittance method for calculating the internal temperature swings in free running buildings, (1974), 59–68.
- [9] G. Sophie, L. Frédéric, C. Luc, P. Julien, and M. Patrick, Application de l'argile crue en construction, *Conf. Int. Francophone NoMaD*. (Douai, 5th-6th Novembre, 2015), 1-10
- [10] Jean Duval, *Moyens de lutte au CHIENDENT (Elytrigia repens) en production biologique*, Quebec.
- [11] A. P'KLA, Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC) : application aux maçonneries 'BTC-Mortier de terre', Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.
- [12] A. Laibi, M. Gomina, B. Sorgho, E. Sagbo, P Blanchart, M. Boutouil6 et D. Sohounhloule, Caractérisation physico-chimique et géotechnique de deux sites argileux du Bénin en vue de leur valorisation dans l'éco-construction, *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 11 (2017), 499-514.
- [13] B. Ladevie, Mise au point de dispositif de caractérisation thermo-physique de matériaux isolants ou pâteux, Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Bordeaux, 1998.
- [14] A. Djossou, Etude des valorisations des propriétés thermophysiques et de la durabilité, en fonction de l'humidité des éco-matériaux de construction au Benin, Thèse de l'Université d'Abomey-Calavi, 2014.
- [15] Yves Jannot and Pierre Meukam, Simplified estimation method for the determination of the thermal effusivity and thermal conductivity using a low cost hot strip, *Meas. Sci. Technol.*, 15 (2004), 1932-1938.
- [16] JCGM, Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, (2008).