DETERMINATION DE LA BANDE DE FREQUENCE DYNAMIQUE (BFD) D'UN PANNEAU COMPOSITE BIOSOURCE BALLE DE RIZ-ARGILE Thicky.

Abstract:

Cette étude examine le comportement thermique en modulation de fréquence d'un panneau composite fait à partir de balle de riz et d'argile de thicky. L'évolution de la température du matériau et de sa densité de flux chaleur en fonction de logarithme décimal de la pulsation excitatrice va permettre de définir une zone correspondant au régime dynamique appelé Bande de Fréquence Dynamique (BFD). L'influence de la profondeur, des coefficients d'échange thermiques a la face avant et a la face arrière ont été proposés.

Key words:-
Balle de riz-argile de thicky -Tempérautre-densité de flux de chaleur-bande de fréquenced'étude

Introduction:-

Le secteur du bâtimentconsomme près de 40 % de l'énergieutilisée à l'échellemondiale [1]. Dans cecontexte, les matériauxissus de ressourcesnaturellesanimaux [2-4] ouvégétales [5-7] offrentune solution écologique aux matériauxtraditionnels.

La balle de rizest un produitsecondaireissu de l'agriculture qui a unemauvaisecapacité à conduire la chaleur à cause de sa structure très poreuse[8-11]. Quand elleestmélangée à de l'argile, ellecrée un matériau composite qui a de bonnespropriétés pour uneisolation thermiquedes bâtiments [12-15].

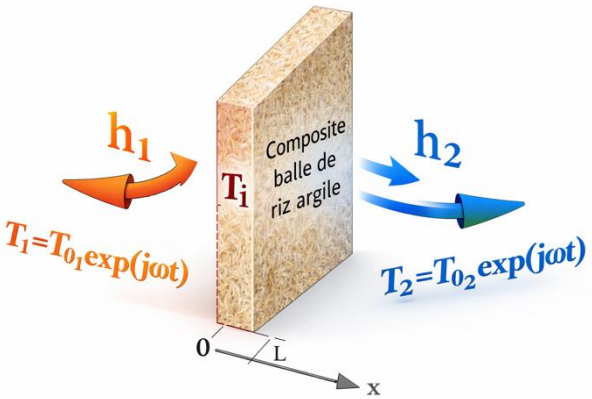
Plusieursrecherchesontdémontré que les matériauxissus de sources naturellesdonnent un bon confortthermique des bâtiments [16-20]. L'impact des coefficients d'échangethermique a la face avant h_1 et à la face arrière h_2, de la pulsation excitatricepermet de mettreen exergue son efficacitéénergétique et d'optimiser le matériauutilisé.

1. Théorie:

1.1 Présentationdumodèled'étude:

Nous présentons pour cette étude, un panneau composite biosourcéenballe de riz-argiled'épaisseur L qui estsoumise à des sollicitationsclimatiquesextérieuresen modulation de fréquence de températuresendynamiquefréquentiel sur la face avant et arrière du matériaucommeindiqué sur la figure ci-dessous (l'épaisseur L=10cm).

LesmilieuxambiantsextérieuresontunetempératuredeT_a=40^{0}Cetlatempératureinitialedu matériauT_i=20^{0}C.



UNDER PEER REVIEW IN IJAR

Figure1:-Échantillonàétudierconstituéed'un matériaucomposite biosourcéenballe de riz-argile, L=0.10m, T_a =30°CetTi =20°C. L: Longueur du mur(m)

Lematériauestsupposéàunetempératureinitiale$T(x, h_1, h_2, t = 0) = T_i = 20°C$

Les paramètresthermo physiques du panneauenmatériau composite biosourcéenballe de riz-argile de thickysontdonnésenfonction de la masse volumique par les formulations M1, M2, M3 et M4 suivantes.

Tableau1:paramètres des différentséchantillons

	ARGILE (%)	BALLE DE RIZ(%)	Masse volumique ($kg.m^{-3}$)	Conductivité thermique	Rm moyenne en MPa
M1	9.1	91.0	280	0.0977	0.65
M2	12.4	87.6	330	0.1165	0.95
M3	14.3	85.7	356,66	0.1272	1.20
M4	17.2	82.8	400	0.1437	1.65

1.2 Équationdediffusiondela chaleur:

Lorsque le panneau en matériau composite biosourcé en balle de riz-argile est soumise à des sollicitations climatiques extérieures. Elles engendrent un phénomène de transfert de chaleur régit par l'équation (1) donnée par :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T + P_p + \nabla \cdot (\lambda \nabla T). \quad (1)$$

Où

λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) La conductivité thermique du matériau

C ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) La capacité spécifique du matériau

P_p (W)source interne de chaleur

$\rho(kg.m^{-3})$La masse volumique du matériau

$T(°C)$ La température considérée en un point

En l'absence de sources et de puits de chaleur interne on a $P_p = 0$

L'équation de la chaleur devient :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Avec $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}\alpha(m^2.s^{-1})$ est le coefficient de diffusivité thermique

Les conditions aux limites du dispositif traduisant les différents échanges thermiques sont données par les expressions suivantes

$$\begin{cases} \lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\Big|_{x=0} = h_1[T(0,t) - T_1] & (3) \\ \lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\Big|_{x=L} = h_2[T(L,t) - T_2] & (4) \end{cases}$$

En considérant que le matériau est à une température initiale T_i et $\overline{T}(x,t)$ la température d'ajout on a donc

$$T(x,t) = \overline{T}(x,t) + T_i \quad (5)$$

L'expression de l'équation de la chaleur devient :

UNDER PEER REVIEW IN IJAR

$\frac{\partial^2(\overline{T}+T_i)}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha}\frac{\partial(\overline{T}+T_i)}{\partial t} = 0$(6)

Les nouvelles conditions aux limites deviennent :

$$\begin{cases} \lambda\dfrac{\partial T\ (x,t)}{\partial x}\Big|_{x=0} = h_1\left[\overline{T}(0,t) + T_i - T_1\right] & (7) \\ \lambda\dfrac{\partial T\ (x,t)}{\partial x}\Big|_{x=L} = h_2\left[\overline{T}(L,t) + T_i - T_2\right] & (8) \end{cases}$$

Les conditions initiales étant :

T_i La température initiale du matériau

$T_1 = T_{01}e^{i\omega t}$ La température à la face extérieur

$T_2 = T_{02}e^{i\omega t}$ La température à la face extérieure

La résolution de l'équation (6) conduit à la solution suivante

$$\overline{T}(h_1, h_2, \alpha, \omega, x, t) = [A_1 \sinh(\gamma.x) + A_2 \cosh(\gamma.x)]e^{i\omega t} \quad (9)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}(1+j) \quad (10)$$

On pose ainsi $r^* = \frac{1}{\gamma} = \sqrt{\frac{\alpha}{2\omega}}(1-j)$ (11)

r^* (m): est la longueur de diffusion thermique

Les termes A_1 et A_2 sont déterminés à partir des conditions aux limites et on obtient :

$$A_1 = \frac{h_1\left(T_{01} - T_i e^{-i\omega t}\right).[\lambda\gamma \cosh(\gamma L) + h_2 \sinh(\gamma L)] + \lambda\gamma\, h_2\left(T_{02} - T_i e^{-i\omega t}\right)}{h_1[h_2 \sinh(\gamma L) + \lambda\gamma \cosh(\gamma L)] + \lambda\gamma[\lambda\gamma \sinh(\gamma L) + h_2 \cosh(\gamma L)]} \quad (12)$$

$$A_2 = \frac{-h_1\left(T_{01} - T_i e^{-i\omega t}\right).[\lambda\gamma \sinh(\gamma L) + h_2 \cosh(\gamma L)] + h_1 h_2\left(T_{02} - T_i e^{-i\omega t}\right)}{h_1[h_2 \sinh(\gamma L) + \lambda\gamma \cosh(\gamma L)] + \lambda\gamma[\lambda\gamma \sinh(\gamma L) + h_2 \cosh(\gamma L)]} \quad (13)$$

L'expression de la densité de flux est donnée par l'équation ci-dessous

$$\emptyset(x, h_1, h_2\omega, \alpha, t) = -\lambda.\frac{\partial T(x, h_1, h_2\omega, \alpha, t)}{\partial x} \quad (14)$$

2. RÉSULTATSETDISCUSSIONS :

2.1 Température et de la densité de flux du panneau composite balle de riz-argile en fonction de logarithme décimal de la pulsation excitatrice

2.1.1 Influencedelaprofondeur(m)dupanneau

L'étude de l'évolution de la température et de la densité de flux de chaleur du panneau d'isolation en balle de riz–argile de thickyen fonction de logarithme décimale de la pulsation excitatrice est proposée sous l'influence de sa profondeur.

UNDER PEER REVIEW IN IJAR

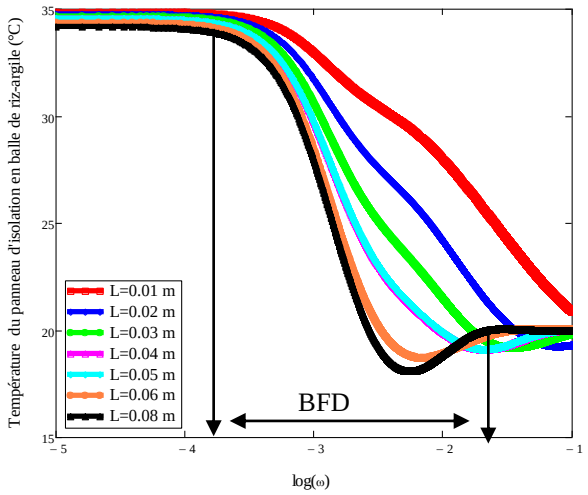


Figure 2: Température dans le panneau en balle de riz-argile en fonction de la fréquence excitatrice ; influence de la profondeur du panneau : h1=25W.m^{-2}.°C^{-1}; h2=0,05 W.m^{-2}. °C^{-1}

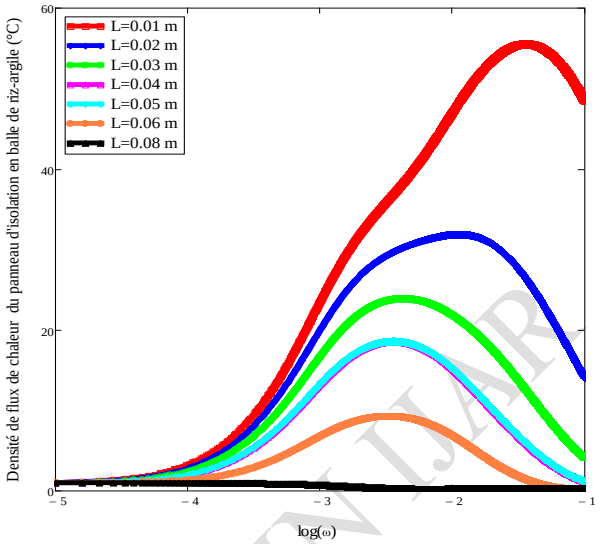


Figure 3: Température dans le panneau en balle de riz-argile en fonction de la fréquence excitatrice ; influence de la profondeur du panneau : h1=25W.m^{-2}.°C^{-1}; h2=0,05 W.m^{-2}. °C^{-1}

- Pour les basses fréquences (log(ω) ≤ -4), la température est importante et reste proche de celle du milieu extérieur (35°C) correspondant à la densité de flux de chaleur presque nulle.

Ce qui signifie que pour ces fréquences, la profondeur de pénétration thermique est largement supérieure à l'épaisseur du panneau. Ce dernier se comporte comme un système quasi-stationnaire, permettant à la chaleur de traverser toute l'épaisseur sans atténuation notable.

- Pour le domaine de transition thermique (-4 < log(ω) < - 2),une diminution rapide de la température est observée. Donc plus l'épaisseur L du panneau d'isolation est grande, plus la chute de température est précoce avec une atténuation thermique importante. Ce domaine correspond à des fréquences dynamiques traduisant une variation de la température et de la densité de flux de chaleur. L'augmentation de l'épaisseur du panneau accroît la résistance thermique équivalente, augmente l'inertie thermique[21,22] et réduit l'amplitude des oscillations thermiques transmises. Le matériau agit alors comme un filtre passe-bas thermique.

- Pour des hautes fréquences (log(ω) ≥ -2)la température minimale est atteinte pour les grandes épaisseurs du panneau (L = 0,06–0,08 m), une atténuation thermique maximale est constatée et une légère remontée ou stabilisation due aux conditions limites est noté.

À haute fréquence les ondes thermiques sont fortement amorties dans les couches superficielles, la chaleur ne pénètre plus efficacement dans le matériaux. Le panneau épais joue un rôle de barrière thermique dynamique. L'augmentation de l'épaisseur du panneau composite en balle de riz–argile renforce son inertie thermique et sa capacité d'atténuation des sollicitations thermiques périodiques.

Le tableau suivant propose la densité de flux maximale en fonction de la pulsation et de la profondeur du panneau.

Tableau2:Valeursdedensitédefluxmaximaleetdelapulsationcorrespondanteen fonction de la profondeur

x(m)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,50	0,06	0,08

UNDER PEER REVIEW IN IJAR

ω(rad.s^{-1})	$10^{-1,44}$	$10^{-1,96}$	$10^{-2,38}$	$10^{-2,4}$	$10^{-2,48}$	$10^{-2,46}$	$10^{-3,06}$
Φmax(W.m^{-2})	55,50	31,87	23,83	18,57	18,55	9,23	0,76

Les résultats présentés dans le tableau 2 montrent une décroissance significative de la densité de flux thermique maximale avec la profondeur. Cette atténuation s'accompagne d'une diminution progressive de la pulsation associée, traduisant la forte absorption des hautes fréquences thermiques par le matériau, en accord avec la théorie de la diffusion thermique.

2.1.2 Influenceducoefficientd'échangethermiquefaceavanth$_1$(W.m^{-2}.C^{-1})

La figure 5 et 6 présentent l'évolution de la température et de la densité du flux de chaleur du panneau d'isolation en balle de riz–argile de thicky en fonction de logarithme décimale de la pulsation excitation, pour différentes valeurs du coefficient d'échange thermique convectif h1, comprises entre 10 W·m^{-2}·°C^{-1} et 40 W·m^{-2}·°C^{-1}.

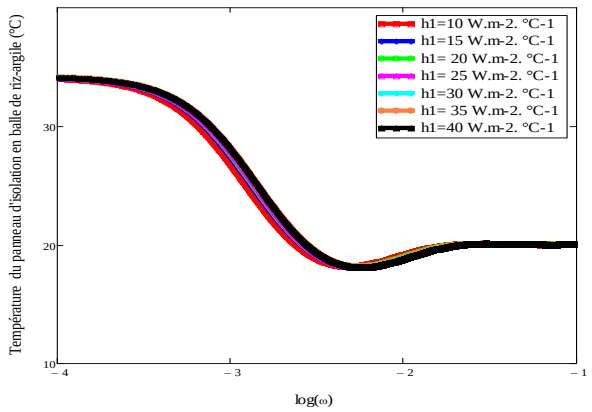


Figure 5 : Température dans le panneau en balle de riz-argile en fonction de la fréquence excitatrice ; influence du coefficient d'échange thermique : x =10^{-3} m ; h2 = 0,05 W. m^{-2}. °C^{-1}.

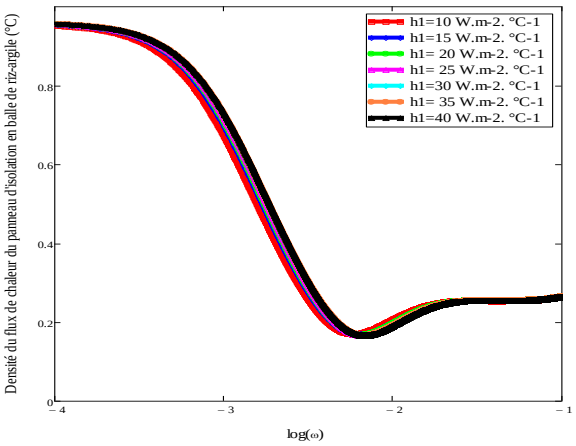


Figure 6 : Densité du flux de chaleur dans le panneau en balle de riz-argile en fonction de la fréquence excitatrice ; influence du coefficient d'échange thermique : x =10^{-3} m ; h2 = 0,05 W. m^{-2}. °C^{-1}.

À basses fréquences d'excitation (log ω ≤ −3), la température du panneau reste relativement élevée et varie faiblement avec la fréquence. Ce comportement traduit un régime quasi-stationnaire. Dans cette zone, l'augmentation du coefficient d'échange thermique h1 entraîne une légère diminution de la température, traduisant un renforcement des échanges convectifs avec le milieu extérieur.

Lorsque la fréquence augmente, une diminution marquée de la température est observée, conduisant à l'apparition d'un minimum situé autour de log ω ≈ −2,7. Ce phénomène met en évidence la capacité du matériau à atténuer les sollicitations thermiques dynamiques.

À hautes fréquences d'excitation (log ω ≥ −2,5), la température tend à augmenter légèrement puis à se stabiliser, tandis que les courbes associées aux différentes valeurs de h1 se confondent progressivement. Ce comportement indique que, dans ce domaine fréquentiel, l'influence des conditions de convection externe devient négligeable, le transfert thermique étant principalement gouverné par les propriétés thermo physiques intrinsèques du matériau.

Tableau3:Valeursdedensitédefluxmaximaleetdelapulsationcorrespondanteen fonction de h1

UNDER PEER REVIEW IJAR

h_1(W.m^{-2}.C^{-1})	10	15	20	25	30	35	40
ω(rad.s^{-1})	1,6x10^{-3}	1,8x10^{-3}	2,0x10^{-3}	2,2x10^{-3}	2,4x10^{-3}	2,6x10^{-3}	2,8x10^{-3}
Φ_{min}(W.m^{-2})	0,980	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04

Le tableau II.2 met en évidence que la pulsation caractéristique associée au flux thermique minimal varie avec le coefficient d'échange thermique h1. Lorsque h1 augmente, la pulsation correspondante se déplace légèrement vers les hautes fréquences, traduisant un renforcement des échanges convectifs à la surface du panneau. En revanche, la variation de la densité de flux maximale demeure modérée, ce qui confirme que le comportement thermique global est principalement gouverné par les propriétés thermo physiques internes du panneau.

2.1.3 Influenceducoefficientd'échange thermiqueàlafacearrièreh$_2$(W.m^{-2}.°C^{-1})

Dans cette partie, la variation de la température et de la densité de flux, toujours en fonction du logarithme de la pulsation, sous influence du coefficient h2 au niveau de la paroi interne va être faite.

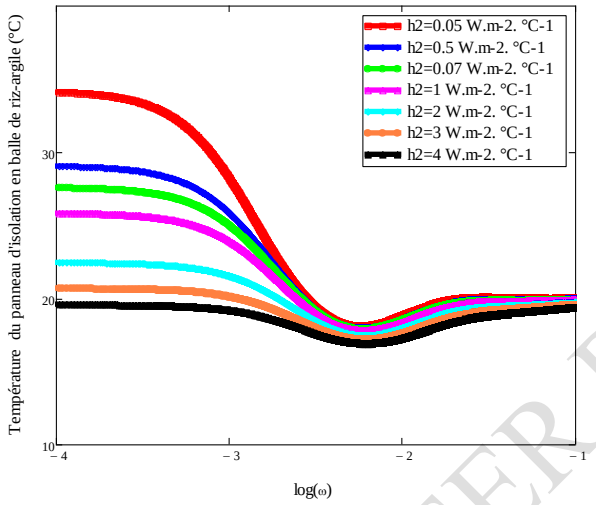


Figure 7 : Température dans le panneau en balle de riz-argile en fonction du logarithme décimal de la pulsation excitatrice : Influence du coefficient d'échange à la face arrière h2, x=0,25m, h1=150 W.m^{-2}.K^{-1}, T0=20°C

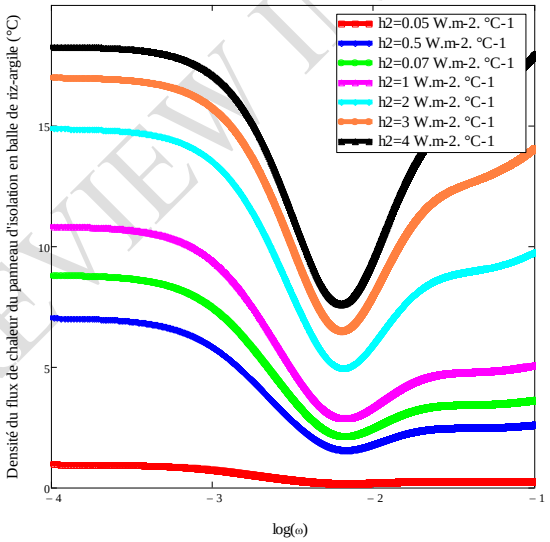


Figure 8 : Densité de flux dans le panneau en balle de riz-argile en fonction du logarithme décimal de la pulsation excitatrice : Influence du coefficient d'échange à la face arrière h2, x=0,25m, h1=150 W.m^{-2}.K^{-1}, T0=20°C

L'analyse des figures 7 et 8 montre trois modes différents du comportement thermique du panneau d'isolation en balle de riz-moussier, selon la pulsation excitatrice et le coefficient d'échange thermique à la face arrière h_2.

À faible pulsation (log ω≲ −3), le système agit comme s'il était presque stable. La température à l'intérieur du panneau baisse quand h_2 augmente, tandis que le flux de chaleur augmente beaucoup. Ce comportement montre que les échanges de chaleur à la face arrière deviennent plus intenses, ce qui permet de mieux évacuer la chaleur et diminue l'efficacité d'isolation du matériau. Dans ce mode, le transfert de chaleur dépend surtout des conditions aux limites.

Dans la zone intermédiaire (−3 ≲ log ω≲ −2), les courbes de température et de flux montrent un minimum marqué. La position de ce minimum n'est pas très influencée par h_2, mais son amplitude varie beaucoup avec ce paramètre.

UNDER PEER REVIEW IN IJAR

Ce minimum correspond à une pulsation caractéristique du système, liée à l'équilibre entre la diffusion thermique à l'intérieur et les échanges à la surface. Il traduit un déphasage maximum entre l'excitation thermique et la réponse du matériau.

À forte pulsation (log $\omega \gtrsim -2$), l'influence de h_2 devient négligeable. La chaleur est limitée aux couches proches de la surface excitée, car la profondeur à laquelle la chaleur pénètre diminue. Le comportement du panneau est alors principalement déterminé par ses propriétés thermiques naturelles, et les échanges à la face arrière n'affectent plus vraiment la température ou le flux à l'intérieur.

Tableau 4: Valeurs de densité de flux et de la pulsation correspondante en fonction de h2

h_2 ($W.m^{-2}.C^{-1}$)	0,05	0,07	0,5	1	2	3	4
ω_{op}($rad.s^{-1}$)	$2,25.10^{-3}$	$2,25.10^{-3}$	$2,25.10^{-3}$	$2,25.10^{-3}$	$2,25.10^{-3}$	$2,25.10^{-3}$	$2,25.10^{-3}$
Φmin ($W.m^{-2}$)	0,16	1.57	2,11	2,90	4,95	6,47	7,62

L'analyse du tableau met en évidence une influence significative du coefficient d'échange thermique à la face arrière h2 sur le flux thermique manimalΦmin du panneau composite balle de riz–argile de thicky. À pulsation optimale constante $\omega op = 2{,}25 \times 10^{-3} rad.s^{-1}$, l'augmentation de h2 de 0,05 à 4 $W{\cdot}m^{-2}{\cdot}°C^{-1}$ entraîne une augmentation de Φmin de 0,16 à 7,62 $W{\cdot}m^{-2}$. Cette évolution traduit une intensification du transfert thermique lorsque les échanges convectifs à la face arrière deviennent plus importants. Toutefois, la réponse n'est pas linéaire sur l'ensemble du domaine étudié : l'accroissement du flux est particulièrement marqué pour les faibles valeurs de h2, puis tend progressivement vers une évolution moins prononcée aux valeurs élevées. Ces résultats montrent ainsi que h2 constitue un paramètre déterminant de la réponse thermique dynamique du panneau et doit être pris en compte dans la détermination de sa bande de fonctionnement fréquentiel et dans l'optimisation de ses performances d'isolation.

3. CONCLUSION:

Cette étude a permis d'étudier en modulation de fréquence, le phénomène de transfert thermique et emmagasinement de chaleur de la balle de riz-argile. Les résultats montrent bien que lorsque l'épaisseur du panneau augmente, sa capacité à résister aux variations de chaleur et à atténuer les effets des chocs thermiques devient plus forte.
Nous avons proposé une bande de fréquence dynamique traduisant une variation significative de la température et de la densité de flux de chaleur.

REFERENCES

[1] International Energy Agency, Energy Efficiency 2019, Paris, France: IEA Publications, 2019.
[2] Ouahiba Mrajji, Mohamed El Wazna, Yahia Boussoualem, Abdeslam El Bouari, and Omar Cherkaoui, (2021) Feather waste as a thermal insulation solution : Treatment, elaboration and characterization, Journal of Industrial TextilesVolume 50, Issue 10, Pages 1674-1697, https://doi.org/10.1177/1528083719869393
[3] Tesfaye T, Sithole B, Ramjugernath D, et al. (2018), Valorisation of chicken feathers: characterisation of thermal, mechanical and electrical properties. *Sustain Chem Pharm*; 9: 27–34. Crossref. Web of Science.
[4] Jagadeeshgouda KB, Ravinder Reddy P, Ishwaraprasad K. (2014), Experimental study of behaviour of poultry feather fiber – a reinforcing material for composites. *Int J Res Eng Technol*; 3: 362–366. Crossref.
[5] Serge Pierre Quenum, Yvette S. Tankpinou Kiki, Judicaël Koffi Agbelele, Crespin Prudence Yabi, Edmond Codjo Adjovi, (2023), Influence of Some Plant Fibers on the Mechanical Performance of Composite Materials, Open Journal of Civil Engineering, 2023, 13, 814-826 https://www.scirp.org/journal/ojce
[6] da Cruz Demosthenes, L.C., et al. (2019) Thermal and Structural Characterization of Buriti Fibers and Their Relevance in Fabric Reinforced Composites. Journal of Materials Research and Technology, 9, 115-123. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.10.036

UNDER PEER REVIEW IN IJAR

[7] Gounni A, Mabrouk MT, El Wazna M, et al. Thermal and economic evaluation of new insulation materials for building envelope based on textile waste. *Appl Therm Eng* 2019; 149: 475–483
[8] Zhang, et al. (2020). Experimental research on a feasible rice husk/geopolymer foam building insulation material. Energy and Buildings, 226, 110358.
[9] Solís, L. C., et al. (2024). Rice Husk-Based Insulators: Manufacturing Process and Thermal Potential Assessment. Materials, 17(11), 2589.
[10] Cuce E, Cuce PM, Wood CJ, et al. (2014), Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: a comprehensive review. *Renewable Sustainable Energy Rev*; 34: 273–299
[11] G. M. H. Mehta and P. J. M. Monteiro(2014), Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2014.
[12] Lubwama, M., et al. (2023–2024) Thermal stability of NaOH modified rice husk fiber-reinforced polylactic acid composites: Effect of rice husks and clay loading.
[13] Yiga VA, Lubwama M, Olupot PW. Thermal stability of NaOH modified rice husk fiber-reinforced polylactic acid composites: effect of rice husks and clay loading. *Results Mater* 2023; 18: 100398.
[14] Silva, A., et al. (2023) Composite materials of rice husk and reed fibers for thermal insulation plates. Sustainability (MDPI).
[15]] B. V. Venkatarama Reddy and K. S. Jagadish, (2003) "Embodied energy of common and alternative building materials and technologies," Energy and Buildings, vol. 35, no. 2, pp. 129–137.
[16] Mamadou Babacar Ndiaye, Ahmadou Diop, Seydou Faye, Youssou Traore and Gregoire Sissoko (2020) étude d'un panneau plan à base de typha et d'argile en régime transitoire, Int. J. Adv. Res. 8(12), 751-758
[17] Sokhna Khadidiatou Ben Thiam, Alassane Ba, Mamadou Babacar Ndiaye, Issa Diagne, Youssou Traore, Seydou Faye, Cheikh Thiam, Pape Touty Traore, Ablaye Fame, Gregoire Sissoko, (2020), One-Dimensional Study of Thermal Behavior of Typha Panel: Spectroscopy Characterization of Heat Exchange Coefficient on Front Face, Journal of Sustainable Bioenergy Systems, 10, 52-61, https://www.scirp.org/journal/jsbs
[18] Antczak, E., M. Asli, F. Brachelet, F. Brue, D. Defer, et A. Lucas. 2017. « Monitoring and Thermal Characterization of Flax Shives for Building Thermal Insulation ». Academic Journal of Civil Engineering 35(2):643-50. doi:10.26168/icbbm2017.97.
[19] A. Asdrubali, F. D'Alessandro and S. Schiavoni, (2015), A review of unconventional sustainable building insulation materials," Sustainable Materials and Technologies, vol. 4, pp. 1–17.
[20] D. A. Kouakou and P. Morel, (2010), Strength and thermal conductivity of lateritic earth bricks stabilized with rice husk ash," Construction and Building Materials, vol. 24, no. 9, pp. 1726–1731.
[21] Youssou TRAORE, Alassane DIENE, Séni TAMBA, Khatry OULD CHEIKH, Moussa DIENG, El Hadji Bala Moussa Nyakhaté, Issa DIAGNE, and Grégoire SISSOKO, (2017), Evaluation of the Thermal Inertia from the Study of the Equivalent Capacity of the Concrete Slab Adjoining to Tow-Plaster in Dynamic Frequency Regime International Journal of Innovation and Applied Studies, ISSN 2028-9324 Vol. 20 No. 2, pp. 609-615, http://www.ijias.issr-journals.org/
[22] Y. Jannot, A. Degiovanni And G. Payet, (2009), Thermal Conductivity Measurement of Insulating Materials with A three Layers Device , International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, N°5-6, Pp 1105-1111

UNDER PEER REVIEW IN IJAR