

ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE MATERIAUX LOCAUX ISOLANTS DE TOITURE SUR LES CHARGES DE CLIMATISATION D'UNE MAISON INDIVIDUELLE EN ARGILE-PAILLE

David TOGUYENI ^a, Ousmane COULIBALY ^b, Abdoulaye OUEDRAGO ^b, Jean KOULIDIATI ^b,

Yvan DUTIL ^{c,*}, Daniel R. ROUSSE ^c

^a UO-UFR/SEA –Laboratoire de physique et de chimie de l'environnement (LPCE) ; 03 BP 7021 Ouagadougou, Burkina Faso

^b UO-UFR/SEA –Laboratoire d'énergie thermique et renouvelable (LETRE), 03 BP 7021 Ouagadougou, Burkina Faso

^c Chaire de recherche industrielle en technologie de l'énergie et efficacité énergétique, École de technologie supérieure, Université du Québec, Département de Génie mécanique, 1100, rue Notre-Dame ouest, Montréal, Canada

RÉSUMÉ

Dans cet article, on étudie l'influence des matériaux locaux isolants de la toiture sur les charges de climatisation d'une maison individuelle en climat tropical sec. Le mur de l'habitat est constitué d'argile-paille et les matériaux isolants de toiture sont le bois blanc et un panneau isolant. Ces matériaux isolants de toiture ainsi que le mélange argile-paille ont été caractérisés au Laboratoire de physique et de chimie de l'environnement par la méthode du plan chaud. Les valeurs des propriétés thermophysiques obtenues sont dans la marge des valeurs de la littérature. Le bâtiment est modélisé sous TRNSYS en utilisant les données climatiques de la ville de Ouagadougou. Les résultats obtenus montrent que le mélange argile-paille réduit les besoins en climatisation par rapport au mur en argile de l'ordre de 8%. Concernant la toiture, l'étude a permis de montrer qu'une isolation de 1,5 cm d'épaisseur (situation courante) occasionne des économies de l'ordre de 8,3 % (bois blanc) à 12,1 % (panneau isolant) sur les charges de climatisation..

Mots Clés : méthode du plan chaud, Influence de la toiture; mur argile-paille; modèle de TRNSYS; charge de climatisation

NOMENCLATURE

Lettres latines

E	Effusivité, $\text{JK}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$
e	Épaisseur de l'échantillon, m
mc	Capacité calorifique du thermocouple, J/K
Rc	Résistance de contact, $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
S	Surface de contact, m^2
T	température, K

t temps, s

Lettres grecques :

φ_0	densité de flux, W/m^2
λ	Conductivité thermique, $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
ΔT	Différence de température, K

1. INTRODUCTION

Le Burkina Faso est l'un des pays où le prix du kWh électrique est le plus élevé. Par ailleurs, du fait de son climat qui est de type tropical chaud et sec, avec des flux solaires globaux atteignant aux mois les plus chauds (mars-avril) 5 700 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{jour})$, il en résulte des charges de climatisation élevées pour les exploitants non sensibilisés à l'utilisation rationnelle de l'énergie. Ainsi, la consommation énergétique des bâtiments du secteur public notamment pour le fonctionnement des appareils de conditionnement d'air est estimée à 30 000 MWh/an, ce qui correspond à un coût financier estimé à 3,4 milliards de FCFA/an [1].

Dans ces conditions, toute amélioration des propriétés thermiques de l'enveloppe du bâtiment présente un intérêt socio-économique important et ce d'autant plus que les matériaux isolants puissent provenir de sources locales. Peu d'études portant sur l'estimation, grâce à

l'utilisation de codes dynamiques, des performances énergétiques des habitats fabriqués à l'aide des matériaux locaux ont été produites. C'est dans ce contexte que cette étude a été entreprise.

Compte tenu du fait que l'argile est le matériau de construction le plus disponible et le plus utilisé localement par les ménages moyens, les recherches ont été concentrées sur l'influence de la paille sur des échantillons de construction en argile et sur des matériaux isolants de toiture (bois blanc, panneau isolant). Le bois blanc est une essence tropicale connue aussi sous le nom d'acajou d'Afrique (*khaya ivorensis*). Quant au panneau isolant, il a été formulé par le Professeur émérite Jean Hugues Thomassin de l'École Supérieure des Ingénieurs de Poitiers (ESIP) à partir de fibres naturelles du Burkina Faso (*hibiscus sabdariffa*) et des mélanges chaux-ciments et confié au LPCE pour leur caractérisation.

Dans un premier temps, des expériences pour déterminer les effusivités et conductivités thermiques à

* auteur correspondant

Adresse électronique : yvan@t3e.info

l'aide d'un dispositif de type plan chaud ont été effectuées. Puis, à partir des travaux de Al-Ajmi et al (2008) [2], Annabi et al (2006) [3], Diez-Webster U. et al (2006) [4], une maison en terre-paille a été modélisée sous TRNSYS pour déterminer l'influence des matériaux isolants de toiture sur les charges de climatisation.

2. CARACTÉRISATION DES ÉCHANTILLONS PAR LA MÉTHODE DU PLAN CHAUD

Un flux de chaleur uniforme est imposé à l'interface de deux échantillons symétriques assimilables à des milieux semi-infinis, c'est-à-dire que le rapport de leur longueur à l'épaisseur de l'élément chauffant est supérieur à 20. Par ailleurs, les faces latérales des deux échantillons sont isolées et le transfert peut être considéré comme unidirectionnel. La réponse en température au cours du temps est mesurée dans le plan du chauffage par un thermocouple. La méthode de caractérisation et d'estimation repose sur les travaux de Jannot et al.[5] :

- une modélisation complète du système par la méthode des quadripôles ;
- l'utilisation de la méthode de Sthefest pour le calcul des transformées de Laplace inverse ;
- l'utilisation de la méthode de Newton pour la minimisation des écarts quadratiques entre thermogrammes expérimentaux et théoriques.

Jannot et al.[5] ont montré qu'après la modélisation par la méthode des quadripôles et l'application de la méthode de Sthefest, pour un milieu semi-infini, la différence de température $T_0(t)-T_0(0)$ peut se calculer par :

$$T_0(t) - T_0(0) = \frac{\phi_0}{2} \left[Rc - \frac{mc}{2(ES)^2} \right] + \frac{\phi_0}{ES\sqrt{\pi}} \sqrt{t} \quad (1)$$

Les variables sont définies dans la nomenclature. Le tracé de $T_0(t)-T_0(0)$ en fonction de la racine carrée du temps est une droite dont la détermination de la pente permet de calculer l'effusivité thermique E . L'inertie de la sonde et de la résistance de contact n'influent pas sur la température après un certain temps. Toutefois, pour

appliquer cette méthode d'estimation, il faut s'assurer que l'hypothèse du milieu semi-infini reste valable sur l'intervalle d'estimation choisi. Le principe de la méthode d'estimation est d'utiliser le début du thermogramme $[0, t_1]$ pour déterminer les paramètres E , Rc et mc . En traçant $T_0(t)-T_0(0)$ en fonction de t , le temps t_1 le temps à partir duquel le tracé n'est plus linéaire. En régime permanent, la différence de température ne varie pas entre les différentes faces. On peut alors estimer la conductivité thermique (λ) par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{\phi_0 e}{S \Delta T} \quad (2)$$

L'hypothèse du milieu semi-infini a été validée à l'aide de la modélisation et la simulation sous COMSOL [6] d'un transfert thermique bidimensionnel dans un milieu composite tricouche (échantillon, air, isolant). Il faut signaler que des travaux de recherche menés, au LPCE ont permis de comparer les propriétés thermophysiques des panneaux issus de l'expérimentation et ceux calculés grâce à l'hypothèse du milieu semi-infini et une méthode inverse [7] fondée sur la minimisation d'une norme entre thermogrammes expérimental et analytique ; les écarts relatifs sont de l'ordre de 8 %.

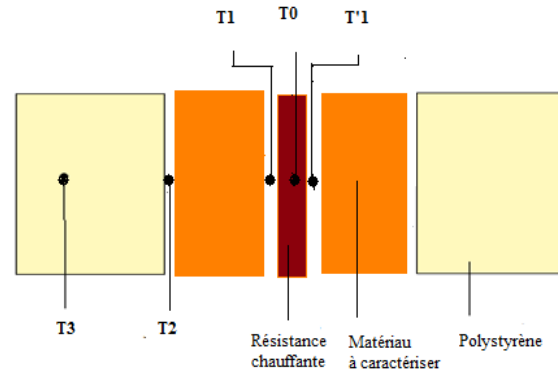


Fig. 1. Schéma du dispositif de caractérisation par plan chaud

Les valeurs moyennes des propriétés thermophysiques des matériaux caractérisés à l'aide de la méthode décrite ci-dessus sont données dans le tableau 1.

Tableau 1. Propriétés des matériaux et données de simulation sous TRNSYS 16.1

Composante	Matériaux	Épaisseur [m]	Conductivité Thermique [$Wm^{-1}K^{-1}$]	Masse volumique [$kg m^{-3}$]	Chaleur spécifique [$Jkg^{-1}K^{-1}$]
Mur argile-paille	Enduit en ciment	0,025	0,87	2200	1050
	Enduit en argile	0,025	2,12	2026	658
	Cas 1: mur en argile	0,20	2,12	2026	658
	Cas 2: mur en argile-paille	0,20	0,53	1796	2202
Toit (référence)	Béton	0,22	1,75	2100	653
	Bitume	0,005	0,17	1050	1000
Toit (bois blanc)	Bois blanc (LPCE)	0,015	0,22	359	772
	Béton	0,22	1,75	2100	653
	Bitume	0,005	0,17	1050	1000
Toit (bois blanc)	Panneau isolant (LPCE)	0,020	0,13	349	705
	Béton	0,22	1,75	2100	653
	Bitume	0,005	0,17	1050	1000

Il est à noter que la capacité calorifique des murs en argile a été fortement augmentée par la présence de paille. Cela s'explique par le fait que la paille est fortement hydrophile. Or, les tests ont été effectués en été alors que les taux d'humidité dans l'air sont très élevés ($HR \approx 95\%$). L'eau ayant une grande capacité thermique, celle du composite argile-paille s'en trouve augmentée. Les incertitudes sur les conductivités et les effusivités thermiques sont estimées à 14 % et 7 %, incluant les biais systématiques causés par l'incertitude sur le flux électrique [8]. Ces résultats sont comparables avec ceux de J.L. Izard [9].

3. MODÉLISATION SOUS TRNSYS 16.1

Les propriétés thermophysiques de l'enduit en ciment, le béton et le bitume sont tirées de la littérature [10]. L'influence de deux isolants de toiture (le bois blanc et un panneau isolant) sur les charges de climatisation pour une épaisseur d'isolation courante de 1,5 cm a été étudiée.

La modélisation sous TRNSYS 16.1 [7] est celle d'une maison à usage d'habitation et d'environ 50 m² de surface dont la façade est orientée au sud. Elle a été construite dans le cadre du projet 10 000 logements sociaux par le Centre de Gestion des Cités (CEGECI) à Ouagadougou, Burkina Faso. Il s'agit d'un bâtiment à 2 chambres, un séjour et une toilette. La configuration du bâtiment est représentée par la figure 2.

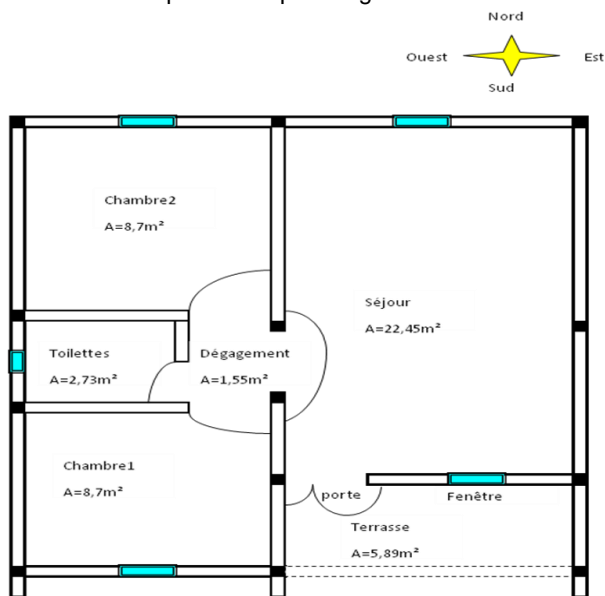


Fig. 2. Schéma du bâtiment

Le plancher est constitué d'une dalle de béton de 15 cm d'épaisseur. Les portes sont en bois à châssis double avec encadrement en fer. Le vitrage est simple et de 4 mm d'épaisseur avec un cadre en fer, d'une conductance hors résistance superficielle égale à $5,7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ et de facteur de gain solaire égal à 0,85. La toiture est une dalle de béton de 22 cm d'épaisseur avec une couche d'étanchéité en bitume. Les murs de l'habitat sont supposés en argile ou argile-paille avec un enduit intérieur en mortier de ciment ou en argile. L'enduit extérieur est en mortier de ciment.

Les effets des isolants que sont le bois blanc et le panneau isolant sur les charges de climatisation sont analysés. Les simulations sont effectuées sur l'année avec un pas de temps de 1 heure (0 à 8760 h) à l'aide du

module de bâtiment multizone (Type 56). Les données météorologiques METEONORM de la ville de Ouagadougou, proposées dans TRNSYS 16.1 sont utilisées pour la simulation.

Le paramètre de consigne de la climatisation est une température de 26 °C à une humidité relative de 50 %. La ventilation et l'infiltration sont fixées à un volume par heure. Des scénarios d'occupation en semaine et fin de semaine correspondant aux chambres et au séjour ont été créés [11]. Le nombre d'occupants est de 4 pour le séjour et de 2 par chambre. Pour l'éclairage, une lampe fluorescente dont la chaleur dégagée est de 8 W est utilisée par local. Le séjour comporte une télévision de 60 W et un réfrigérateur de 70 W ayant un coefficient d'utilisation de 100 % et un lecteur DVD de 150 W dont le coefficient d'utilisation est fixé à 40 %.

4. RÉSULTATS DES SIMULATIONS ET DISCUSSIONS

Les calculs à partir des propriétés thermophysiques issues de l'expérimentation montrent que le bâtiment possède une bonne inertie thermique laquelle varie entre $2,1 \times 10^6 \text{ J}^2\text{m}^{-6}\text{K}^{-2}$ et $2,83 \times 10^6 \text{ J}^2\text{m}^{-6}\text{K}^{-2}$. Cela induit un écrêtement des amplitudes de température interne avec un déphasage de celles-ci par rapport à celles de l'extérieur.

La réduction des charges annuelles est de l'ordre de 8 % entre le mur en argile et celui en argile-paille. Les résultats permettent de constater que la meilleure isolation est obtenue pour le panneau isolant. On note aussi que l'isolation de la toiture de 1,5 cm d'épaisseur permet d'abaisser les charges de 8,3 % à 12,1 % en passant du bois blanc au panneau isolant.

Étant donné que les résultats de simulations établissent qu'une enveloppe du bâtiment en argile est moins performante que celle en argile-paille, seule cette dernière configuration a été utilisée pour étudier l'impact de l'isolation du plafond. La figure 3 donne les charges mensuelles dans le bâtiment pour un mur en argile-paille en fonction des différents isolants de la toiture pour un enduit extérieur et intérieur en ciment.

Comme attendu, les mois d'avril et de mai, qui sont les plus chauds de l'année (Température moyenne maximale de 41,8 °C et 41,6 °C respectivement), sont ceux pour lesquels les gains globaux de chaleur dans le bâtiment et par suite les charges de climatisation sont les plus importants. Pour ces deux mois, les écarts relatifs entre le cas « argile-paille et toit non isolé » et les autres cas varient entre 8,4 % et 13,4 %.

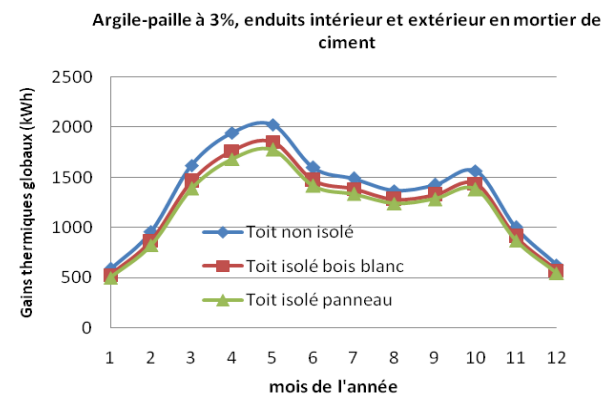


Fig. 3. Gain thermique mensuel pour chaque configuration du bâtiment

Afin de tenir compte des incertitudes sur les valeurs des propriétés thermophysiques, deux séries de simulations ont été réalisées pour les trois types d'isolation du toit (figure 4). Dans la série 1, toutes les propriétés thermophysiques prennent leurs valeurs minimales compte tenu des incertitudes, alors que dans la série 2, elles prennent leurs valeurs maximales. Les résultats de simulations pour chacune des deux séries montrent que les réductions de gains thermiques sont du même ordre de grandeur (8 % en moyenne) que lorsque l'on utilise les valeurs moyennes, en passant de l'argile à l'argile-paille. Lorsqu'on passe de toit non isolé aux toits isolés, pour la série 1, on note qu'en moyenne les réductions de gains thermiques sont de 9,9 % et 14,1 % respectivement avec le bois blanc et le panneau isolant. Par contre pour la série 2, cette réduction est de 5,7 % pour le bois blanc et 9,4 % pour le panneau. En revanche, les écarts relatifs des gains thermiques globaux des séries 1 et 2 par rapport à ceux obtenus avec les valeurs moyennes des propriétés thermophysiques varient entre -4,4 % et +2,9 %.

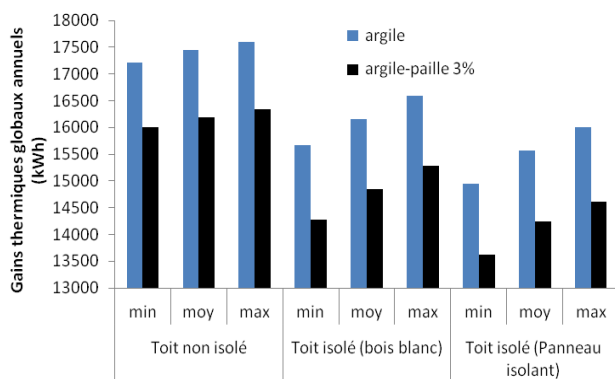


Fig. 4. Extrêmes et moyennes des gains thermiques globaux annuels

5. CONCLUSION

L'influence de matériaux locaux isolants de toiture sur les charges de climatisation d'une maison en argile-paille a été étudiée. Dans un premier temps, les propriétés thermophysiques (conductivité, effusivité thermique, masse volumique) de ces matériaux ont été déterminées à l'aide d'une méthode du type plan chaud avec une analyse de thermogrammes en stationnaire et en instationnaire ; les résultats obtenus sont de l'ordre de grandeur des valeurs de la littérature [9] lorsque la méthode est appliquée aux cas de mortiers de cimentable.

Dans un second temps, les simulations effectuées sous TRNSYS 16.1 ont permis de retenir tout d'abord que le mur en argile-paille présente des charges annuelles de climatisation de 8 % inférieures à celles du mur d'argile. Ensuite, l'étude met en évidence l'influence de ces matériaux isolants de toiture sur les charges de climatisation. Elle a montré qu'une isolation de 1,5 cm d'épaisseur d'isolant permet de faire des économies de l'ordre de 8,3 % (bois blanc) à 12,1 % (panneau isolant) sur les charges de climatisation.

Cette étude démontre le potentiel important que représente l'utilisation de matériaux locaux dans le but d'améliorer l'isolation thermique des bâtiments.

Cependant, il reste encore beaucoup d'approches alternatives à étudier. En effet, l'épaisseur de l'isolant n'est pas optimisée et des analyses économiques préliminaires laissent présager qu'elle pourrait être augmentée. De même, l'utilisation d'un espace d'air intégré aux murs, d'enduit extérieur clair et de larmiers permettrait possiblement d'améliorer encore les performances thermiques à peu de frais [8].

REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier les partenaires de la Chaire de recherche t3e qui s'investissent dans la réalisation de leurs projets. Daniel Rousse est reconnaissant au CRSNG pour une subvention à la Découverte et aux partenaires financiers de t3e.

RÉFÉRENCES

- [1] Direction Générale de l'Énergie Audit Énergétique, et Stratégie Énergétique Domestiques (SED), Ministère de l'Énergie et des Mines du Burkina Faso, 2003
- [2] Al-ajmi FF, Hambi VI Simulation of energy consumption for Kuwaiti domestic buildings, Energy and buildings 2008;40:1101-1109
- [3] Annabi M., Mokhtari A., Hafrad T. A. (2006), Estimation des performances énergétiques dans le contexte maghrébin, Revue des énergies renouvelables 2006; 9(2): 99-106.
- [4] Diez-Webster U. et al., Modélisation d'une maison à énergie positive, Projet de fin d'études, INSA Lyon, 2006
- [5] Jannot, J, Zoubir, A, Kanmogne, A Transient hot plate method with two temperature measurements for thermal characterization of metals, Meas. Sci. Technol. 2006;17:69-74
- [6] Kouchade, A.C. Détermination en routine de la diffusivité massique dans le bois par méthode inverse à partir de la mesure électrique en régime transitoire, Thèse PhD., ENGREF, Nancy (France), 2004
- [7] Klein S. A. et al, TRNSYS version 16, User manual, solar energy laboratory, university of Wisconsin, 2006
- [8] Toguyeni, D., Coulibaly, O., Ouedraogo, A., Kouliadiati, J., Dutil, Y., Rousse, D., Study of the influence of a roof insulation from local materials on cooling loads of a house build of clay and straw, Energy & Buildings, (Accepted, Jan 2012), 2012
- [9] Izard, JL Construire avec le climat réunionnais, ENSA-Marseille., http://www.envirobat-reunion.com/IMG/pdf_Construire_a_La_Reunion_1A.pdf
- [10] Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie, Efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale, Tome 1 : Conception des nouveaux bâtiments, PRISME, 2001
- [11] Coulibaly, O. Contribution à l'élaboration d'une réglementation thermique et énergétique des bâtiments au Burkina Faso, Données de base multiparamétriques et modélisation thermo-aérodynamique sous CoDyBa et TRNSYS, thèse PhD, université de Ouagadougou, Burkina Faso, 2001