

Caractérisation et modélisation du comportement thermique de panneaux biosourcés dérivés de résidus bois guyanais

Characterization and modeling of the thermal behavior of bio-based panels derived from Guyanese wood residues

Amal HARAKETI^{1,2}, Ryad BOUZOUIDJA^{1,2*}, Tingting VOGT WU^{1,2}, Pierre VIGNON^{1,2}, Jean-Luc COUREAU^{1,2}, Arnaud DAY^{3,4}, Julie BOSSU⁵

¹ Université de Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, France

² Arts et Metiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, France

³ Fibres Recherche Développement, Technopole de l'Aube en Champagne, Hôtel de Bureaux 2 – 2 rue Gustave Eiffel, CS 90601-10901 Troyes Cedex 9, France

⁴ CNRS, UMR8576, UGSF- Unité de Glycobiologie Structurale et Fonctionnelle, Unité de Lille, 59000 Lille, France

⁵ CNRS, UMR EcoFoG, Guyane Française, Kourou, France

*(Corresponding author: ryad.bouzouidja@u-bordeaux.fr)

Résumé - Ce travail présente un procédé de fabrication de panneaux isolants à partir de fibres de bois guyanais. Il s'appuie sur la valorisation de connexes forestiers locaux aux propriétés intrinsèquement variables. Une voie sèche non-tissée est utilisée pour l'ouverture, le mélange et la formation de la nappe fibreuse. Les panneaux consolidés sont caractérisés thermiquement sous différents états hygriques. Une modélisation hygrothermique de paroi est menée sous conditions climatiques tropicales guyanaises. Elle permet d'estimer le déphasage thermique et l'amortissement des températures à travers l'enveloppe.

Abstract – This study presents a manufacturing process for insulation boards made from Guyanese wood fibers. The approach relies on the valorization of locally available forest residues. A dry nonwoven process is used for fiber opening, mixing, and mat formation. Thermal properties are assessed under varying moisture conditions. A hygrothermal wall model is developed under tropical Guyanese climate conditions. Thermal time lag and attenuation effects through the building envelope are quantified.

Nomenclature (11 points, 2 colonnes)

w	Teneur en eau, kg/m ³	λ	Conductivité thermique, W/(m · K)
D	Coefficient de transport du liquide, m ² /s	δ	Perméabilité à la vapeur d'eau, kg/(m · s · Pa)
H	Enthalpie, J/kg	ϕ	Déphasage thermique, h
T	Température, °C	<i>Indices et exposants</i>	
L	Chaleur latente de vaporisation, J/kg	l	Liquide
f	Amortissement thermique, –	v	Vapeur
A	Amplitude de la température, °C	p	Pression de vapeur, Pa
t	Temps, s	int	Intérieur du comble
<i>Symboles grecs</i>		ext	extérieur de la toiture
φ	Humidité relative, –		

1. Introduction

Dans le contexte de la transition écologique du bâtiment, l'adaptation de l'isolation thermique aux conditions climatiques locales constitue un enjeu majeur. En Guyane française, le climat équatorial se caractérise par des températures élevées et une humidité persistante, générant un inconfort thermique durable, renforcé par l'alternance entre saisons des pluies et périodes sèches chaudes à faible amplitude journalière. Les constructions légères à faible inertie thermique sont particulièrement sensibles aux sollicitations thermo-hygrométriques. Leur capacité limitée de stockage de chaleur favorise le recours à la climatisation, solution énergivore peu compatible avec les objectifs de sobriété énergétique.

Dans ce contexte, les matériaux biosourcés issus de fibres végétales ou de résidus forestiers constituent une alternative pertinente aux isolants conventionnels importés [1]. Ils présentent des propriétés thermiques et hygrothermiques adaptées, ainsi qu'un potentiel de séquestration du carbone sur le cycle de vie du bâtiment [2].

Ce travail vise la valorisation de ressources locales guyanaises par le développement de panneaux isolants en fibres de bois tropicaux pour la toiture, élément fortement sollicité par les apports solaires [3]. L'enjeu scientifique porte sur l'influence de l'humidité sur leurs propriétés thermiques, étudiée par caractérisation expérimentale sous différents états hygrométriques [4] et par modélisation hygrothermique sous WUFI 2D afin d'évaluer l'amortissement et le déphasage thermique en climat équatorial.

2. Processus de fabrication des panneaux en fibres de bois guyanais

Cette section décrit la fabrication de panneaux isolants en fibres de bois guyanais par voie sèche continue, depuis la préparation de la ressource lignocellulosique jusqu'au stockage des panneaux consolidés (Figure 1). Le procédé repose sur la valorisation de connexes de scieries locales issues d'essences tropicales guyanaises (*Dicorynia guianensis*, *Eperua falcata*), caractérisées par une forte variabilité granulométrique et physico-chimique, nécessitant un conditionnement préalable. Les sciures sont tamisées à 2 mm et conditionnées à une teneur en eau inférieure à 12 %, condition essentielle à la reproductibilité de la formation de la nappe et du pressage thermique [5]. La fabrication de matériaux non tissés à base de bois tropicaux s'appuie sur une voie sèche aérodynamique de type non-tissé, assurant l'individualisation et l'homogénéisation des fibres [6]. Un liant thermoplastique bicomposant Polypropylène-Polyéthylène (PP/PE) [7] est incorporé à hauteur de 7 % (m/m) afin d'assurer la cohésion du matériau [8]. Les fibres sont ensuite déposées par aspiration pour former une nappe poreuse d'une épaisseur de 2 cm (fibres mélangées au liant PP / PE), préformée puis consolidée par pressage à chaud à environ 150 °C. Le formage est réalisé à déplacement contrôlé, avec un taux de compression proche de 36 %, garantissant une épaisseur homogène. Les panneaux sont enfin refroidis, stabilisés et stockés avant caractérisation. La teneur élevée en extractibles des essences tropicales influence la cinétique de consolidation et confère aux panneaux une durabilité biologique accrue, adaptée au climat chaud et humide guyanais [9].

3. Évaluation des propriétés thermophysiques et hygroscopiques

3.1. Échantillonnage

Les panneaux étudiés sont constitués de fibres de bois tropicales de compositions variées afin d'évaluer leur performance thermique sous différentes conditions d'usage. Deux formats

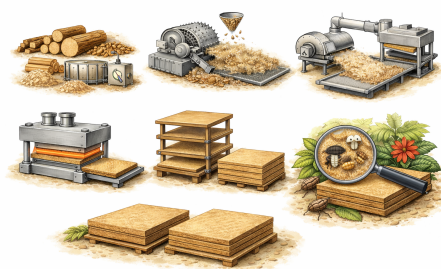


Figure 1 : Schéma illustratif du processus de fabrication des panneaux en fibres de bois guyanais.

ont été testés : des panneaux de 40×40 cm et des échantillons de 10×10 cm, pour une épaisseur ($25,0 \pm 1,0$) mm. Les mesures ont été réalisées selon trois états hydriques : un état sec obtenu par séchage à ($70,0 \pm 5,0$) °C selon la norme NF EN ISO 10456, un état ambiant correspondant aux conditions standards de laboratoire (Température de l'air (20 ± 2) °C, humidité relative de l'air ($50,0 \pm 5,0$) %), et un état humide simulant une saturation en eau (Température de l'air ($20,0 \pm 2,0$) °C, humidité relative de l'air ($90,0 \pm 5,0$) %). Ces configurations permettent d'analyser l'influence de la teneur en eau sur les propriétés thermiques.

3.2. Dispositifs expérimentaux

Deux expériences ont été menées pour caractériser le panneau isolant (la méthode flumétrique (HFM) et la méthode de sorption/desorption (DVS)).

La méthode HFM est largement utilisée pour la mesure de la conductivité thermique des matériaux homogènes en régime permanent [10]. L'échantillon est placé entre une plaque chaude (30 °C) et une plaque froide (20 °C), régularisées par des bains thermostatés. Le dispositif est isolé afin de garantir un transfert thermique unidirectionnel. Le flux thermique est mesuré à l'aide de deux capteurs Captec®, tandis que le gradient de température est suivi par des thermocouples de type T ($\pm 0,5$ °C). La conductivité thermique est ensuite déterminée à partir de l'équation 1 [11].

$$\lambda = q \cdot \frac{d}{\Delta T} \quad (1)$$

où q est la densité de flux de chaleur (W/m^2), ΔT ($\Delta T = T_1 - T_2$) est la différence de température dans l'échantillon (K), T_1 est la température de la plaque chaude, T_2 est la température de la plaque froide, d est l'épaisseur de l'échantillon (m) et λ se réfère à la conductivité thermique ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$).

Matériau	Masse volumique (kg/m^3)	Capacité thermique volumique ($\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$)	Conductivité thermique ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	Diffusivité thermique (m^2/s)	Effusivité thermique ($\text{J}/\text{m}^2/\text{K}/\text{s}^{1/2}$)
Panneau isolant bois	206	$3,88 \cdot 10^5$	0,057	$1,47 \cdot 10^{-7}$	148
Laine de verre	25	$4,2 \cdot 10^4$	0,040	$3,8 \cdot 10^{-7}$	41
Chêne	870	$1,39 \cdot 10^6$	0,29	$1,2 \cdot 10^{-7}$	635
Béton	2 300	$2,3 \cdot 10^6$	1,80	$7,8 \cdot 10^{-7}$	2 035

Table 1 : Propriétés thermiques du panneau isolant en fibres de bois guyanais et de matériaux de référence.

La Table 1 présente une synthèse des propriétés thermophysiques du panneau isolant BC (Cecropia bois). Ce matériau a été sélectionné en raison de la forte disponibilité de cette fibre

en Guyane. Il présente une faible conductivité thermique ($0,057 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$), comparable à celle de la laine de verre, associée à une masse volumique plus élevée (206 kg/m^3). Cette combinaison confère une capacité thermique volumique accrue et une diffusivité thermique réduite ($1,47 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$), favorables à l'amortissement et au déphasage thermique. Comparé au chêne et au béton, le panneau se positionne comme un compromis entre pouvoir isolant élevé et inertie thermique intermédiaire.

Le comportement hygroscopique du matériau a été déterminé à partir de la caractérisation des fibres cecropia réalisée par la méthode DVS. Ce choix repose sur la composition du panneau isolant, qui est essentiellement constituée de fibres de bois. Le PE présent dans le matériau joue un rôle de liant et présente une capacité d'absorption d'eau très faible. Son influence sur le comportement hygroscopique global du panneau est donc considérée comme négligeable par rapport à celle des fibres de bois. La courbe DVS (Figure 2) met en évidence une augmentation

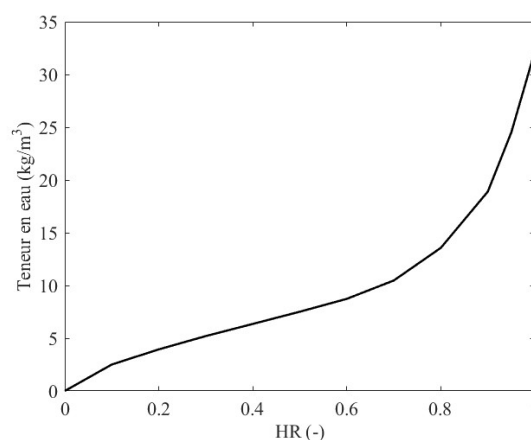


Figure 2 : *Fonction de stockage d'humidité (sorption) des fibres cecropia*

progressive de la teneur en eau, passant d'environ 0 kg/m^3 à $\text{HR} = 0 \%$ à 8 kg/m^3 pour $\text{HR} \approx 60 \%$, traduisant une adsorption dominante aux sites hygroscopiques. Au-delà de $\text{HR} \approx 80 \%$, la teneur en eau augmente fortement, de 12 kg/m^3 à plus de 30 kg/m^3 pour $\text{HR} = 95\text{--}100 \%$, indiquant l'apparition de mécanismes de condensation capillaire. Cette évolution non linéaire confirme la forte sensibilité hygrothermique du panneau d'isolation en bois tropical sous conditions de forte humidité relative.

4. Modélisation du comportement de toiture

4.1. Site d'étude

Le site d'étude est située en Guyane Française ($5^\circ 10' 23.938'' \text{ N}$; $52^\circ 39' 23.088'' \text{ W}$). La composition de toiture retenue est mentionnée dans la Table 2. La toiture étudiée a été modélisée selon une approche multicouche représentative de sa composition réelle, pour une orientation ouest, avec une pente de 45° .

4.2. Modélisation

Le logiciel WUFI 2D [12] a été utilisé pour analyser le comportement hygrothermique de la toiture intégrant des panneaux en fibres de bois BC. Basé sur le modèle de Künzle [13], il résout par volumes finis implicites, à l'aide d'un algorithme tridiagonal, deux équations

Couche	Tôle on- dulée	Lame d'air	Pare-pluie	Frein vapeur	Panneau isolant	Couche d'air int.
Épaisseur (mm)	1.8	20	—	—	50	1000
Sd (m)	—	—	0.18	20	—	—
Émissivité (-)	0.9	—	—	—	—	—
Porosité	0.001	0.999	0.001	0.001	0.83	0.999

Table 2 : Composition de la paroi de toiture étudiée.

couplées décrivant le transport d'humidité (Equation 2) et le transfert de chaleur (Equation 3).

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{l,\varphi} \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi p_{sat})) \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + L_v \nabla \cdot (\delta_p (\varphi p_{sat})) \quad (3)$$

4.3. Paramètres d'entrée du modèle et conditions aux limites

La simulation WUFI requiert la définition des propriétés des matériaux, notamment la densité volumique, la porosité, la chaleur spécifique, la conductivité thermique et la résistance à la diffusion de vapeur. On a utilisé les données de la Table 2 et les premiers résultats de caractérisation des panneaux. Par ailleurs, un taux de renouvellement d'air de 1 vol/h a été pris en compte au niveau du comble. Les données climatiques (conditions limites extérieures), ap-

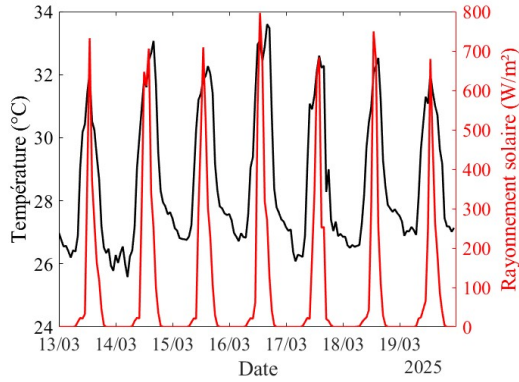


Figure 3 : Evolution de la température extérieure et du rayonnement solaire du 13 au 19 mars .

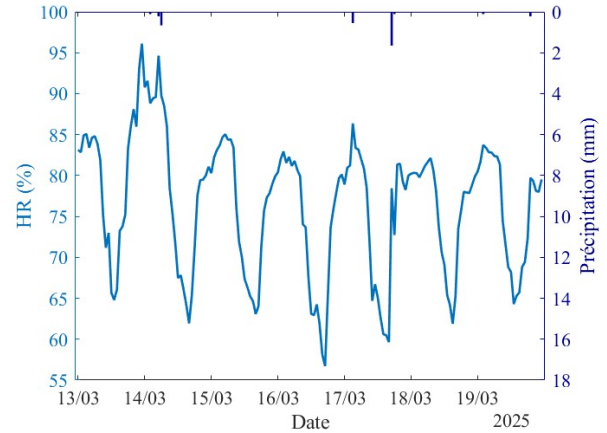


Figure 4 : Evolution de l'humidité relative et des précipitations du 13 au 19 mars.

pliquées à la surface extérieure de la toiture, ont été fournies par la station météo installée proche des modules constructifs expérimentaux. On s'intéresse dans cette étude à une semaine ensoleillée, du 13 au 19 mars, présentée par les figures 3 et 4. Pour les conditions aux limites intérieures (Figure 5), une température constante de 25 °. °C et une humidité relative de 50 % sont imposées à la surface du plafond. Des valeurs correspondent à des conditions de confort thermique recommandées par les normes EN ISO 7730 et EN 16798. Un coefficient d'échange thermique intérieur de 8 W/(m² . K) est également appliqué afin de représenter les échanges convectifs entre l'air intérieur et la paroi [14].

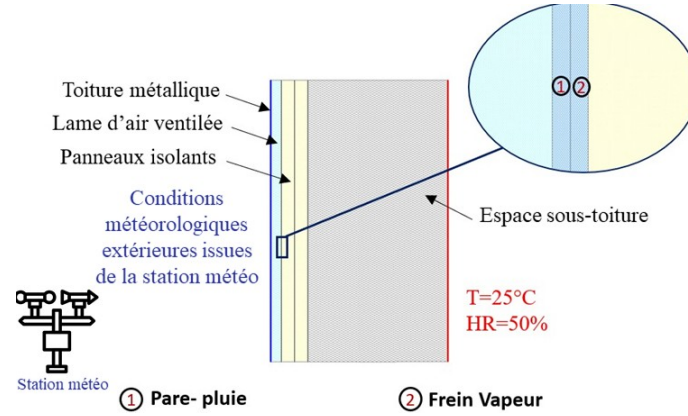


Figure 5 : Les conditions aux limites appliquées à la toiture

4.4. Discrétisation spatiale et temporelle

Une étude de convergence spatiale a été menée par raffinement progressif du maillage, la convergence étant atteinte lorsque la variation relative des températures et des flux thermiques restait inférieure à 1 %. Un maillage de 500 mailles a permis d'assurer la stabilité des résultats à coût numérique maîtrisé. La discrétisation temporelle repose sur un pas de temps horaire, associé à un schéma implicite, garantissant une représentation fidèle de la réponse dynamique de la toiture aux variations climatiques.

5. Évaluation de la performance des panneaux d'isolation

5.1. Indicateurs de performances

Afin de décrire le comportement d'un paroi et son inertie, Lu et al. [15] propose d'utiliser les grandeurs suivantes : Le facteur d'amortissement thermique qui caractérise la capacité d'une paroi à atténuer l'amplitude d'une sollicitation thermique entre l'extérieur et l'intérieur. Elle est définie par le rapport entre les amplitudes de températures intérieures et extérieures (Equation 4).

$$f = \frac{A_{\text{int}}}{A_{\text{ext}}} \quad (4)$$

Le déphasage thermique qui correspond au temps séparant les instants des maxima des températures extérieure et intérieure (équation 5). Une valeur importante de déphasage est traduite par une forte inertie thermique de la paroi, une meilleure aptitude à retarder la transmission des sollicitations thermiques vers l'intérieur du bâtiment et une amélioration du confort thermique.

$$\Phi = t_{\text{int,max}} - t_{\text{ext,max}} \quad (5)$$

La figure 6 présente l'évolution des températures extérieure et intérieure sur la semaine de 13 mars qui est une période ensoleillée avec des pics de rayonnement solaire compris entre 650 et 800 W/m². Cette semaine est caractérisée par une humidité relative variant entre 55 et 95 % et de faibles précipitations (Figure 4). L'amplitude thermique extérieure accrue renforce l'effet d'amortissement de la toiture, se traduisant par un facteur d'amortissement faible (0,02 à 0,05) et un déphasage compris entre 6 et 8 heures (Table 3). La toiture atténue efficacement les sollicitations thermiques en situation fortement ensoleillée, avec un déphasage important.

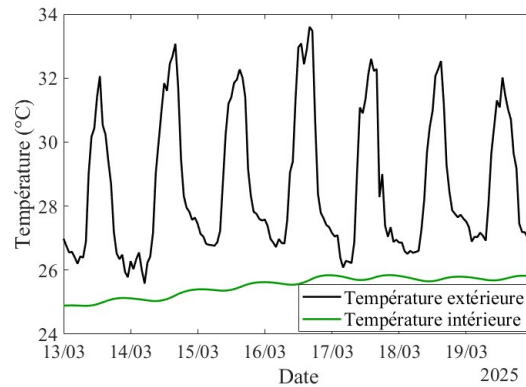


Figure 6 : Evolution de la température extérieure de l'air extérieur et de la température à l'intérieur du comble pour la semaine du 13 Mars

	13/03	14/03	15/03	16/03	17/03	18/03	19/03
Facteur d'amortissement	0.03	0.05	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03
Déphasage (h)	8	7	8	7	7	6	7

Table 3 : Facteur d'amortissement et déphasage thermique pour la semaine de 13 mars

6. Conclusion

Ce travail s'inscrit dans une démarche de valorisation de ressources lignocellulosiques locales en Guyane, visant le développement de panneaux isolants biosourcés adaptés au climat tropical humide. Un procédé de fabrication par voie sèche non-tissée a permis la production de panneaux à partir de connexes de scieries locales. Les caractérisations thermophysiques mettent en évidence une faible conductivité thermique ($0,057 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), associée à une masse volumique plus élevée conférant une inertie thermique intermédiaire. L'analyse hygroscopique par DVS révèle une forte sensibilité à l'humidité relative au-delà de 80 %. La modélisation hygrothermique sous WUFI 2D montre un amortissement significatif des flux thermiques et un déphasage pouvant atteindre 8 h lors des journées les plus ensoleillées, améliorant ainsi le confort thermique à l'intérieur de la cabane. L'analyse de sensibilité par Sobol souligne le rôle dominant des propriétés dépendantes de l'état hydrique et des échanges convectifs. Les perspectives concernent le calage expérimental du modèle, l'amélioration des lois matériaux et l'optimisation des configurations de toiture en climat équatorial.

References

- [1] Alioua, T., *Étude, à l'échelle du mur, des transferts hygrothermiques dans les composites biosourcés*, Theses, Université Paris-Est ; Université Hadj Lakhdar (Batna, Algérie), Available at <https://theses.hal.science/tel-03545922> (2020).
- [2] Liu, L., Li, H., Lazzaretto, A., Manente, G., Tong, C., Liu, Q. and Li, N., "The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, pp. 912–932 (2017).
- [3] Soubdhan, T., "Building solar protection under tropical climate: an experimental study of roof insulation; Protection solaire des batiments en climat tropical humide: etude experimentale de l'isolation en toiture", (2003).

- [4] Abdou, A. and Budaiwi, I., “The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content”, *Construction and Building materials*, 43, pp. 533–544 (2013).
- [5] Vignon, P., *Caractérisation et optimisation des propriétés d’isolants thermiques non tissés à base de fibres de bois*, Ph.D. thesis, Université de Bordeaux (2020).
- [6] Russell, S. J., *Handbook of nonwovens*, Woodhead Publishing (2022).
- [7] Baudrit, C., Hajjar, H., Fernandez, C., Moreau, J., Michaud, F., Candelier, K., Damay, J., Day, A., Duborper, A., Coureau, J.-L. et al., “Biological durability of Guyanese fibre insulation boards in tropical context–part 2: predicting fungal and termite resistance using explainable machine learning”, *Wood Material Science & Engineering*, pp. 1–13 (2025).
- [8] Chapman, R., “Chemical bonding. Russell, SJ Handbook of nonwovens”, (2007).
- [9] Anouhe, J.-B. S., Niamké, F. B., Faustin, M., Virieux, D., Pirat, J.-L., Adima, A. A., Kati-Coulibaly, S. and Amusant, N., “The role of extractives in the natural durability of the heartwood of *Dicorynia guianensis* Amsh: new insights in antioxydant and antifungal properties”, *Annals of Forest Science*, 75(1), p. 15 (2018).
- [10] Scarpa, M., Ruggeri, P., Peron, F., Celebrin, M. and De Bei, M., “New measurement procedure for U-value assessment via heat flow meter”, *Energy Procedia*, 113, pp. 174–181 (2017).
- [11] Dubois, S. and Lebeau, F., “Design, construction and validation of a guarded hot plate apparatus for thermal conductivity measurement of high thickness crop-based specimens”, *Materials and structures*, 48(1), pp. 407–421 (2015).
- [12] Zirkelbach, D., Schmidt, T., Künzel, H., Kehrner, M. and Bludau, C., “WUFI® 2D”, *Fraunhofer Institute for Building Physics* (2007).
- [13] Künzel, H. M. and Kiessl, K., “Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components”, *International Journal of heat and mass transfer*, 40(1), pp. 159–167 (1996).
- [14] Biddulph, P., Gori, V., Elwell, C. A., Scott, C., Rye, C., Lowe, R. and Oreszczyn, T., “Inferring the thermal resistance and effective thermal mass of a wall using frequent temperature and heat flux measurements”, *Energy and Buildings*, 78, pp. 10–16, doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.004>, Available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814003041> (2014).
- [15] Lu, Y., Hu, J. and Zhong, K., “Optimization of insulation layer location and distribution considering maximum time lag and damping factor”, *Case Studies in Thermal Engineering*, 30, p. 101766, doi:<https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101766> (2022).

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le projet ANR-22-CE43-0019 PANTHER²-Guyane d’où provient le financement et la base de données. Les auteurs souhaitent aussi remercier Olivier LAGARDERE de l’Institut de Mécanique et d’Ingénierie I2M UMR CNRS 5295 pour son aide et son support dans la fabrication des panneaux d’isolation. La fabrication a pu être réalisée sur les équipements de la plateforme XYLOPATE du Cluster de Plateformes I2M.