

Mesure de la conductivité thermique de matériaux isolants bio/géosourcés humides

M. EL ASSAAD¹, Y. PLANTEC^{1,2}, T. COLINART^{1*}, T. LECOMPTE¹

¹ Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient, France

² Cellaouate, 29600 Saint Martin des Champs, France

(* auteur correspondant : thibaut.colinart@univ-ubs.fr)

Résumé – Connaître les évolutions de la conductivité thermique d'un matériau en fonction de la température et de la teneur en eau est utile pour affiner la prédiction des performances énergétiques des bâtiments ou le confort hygrothermique. Les mesures sur des matériaux humides par des méthodes en régime permanent s'accompagnent de transferts d'humidité du côté chaud vers le côté froid de l'échantillon et donc de transferts latents pouvant altérer la précision de la mesure. L'objectif de cette étude est d'examiner l'impact de ces transferts d'humidité dans divers matériaux isolants bio/géosourcés humides lors des mesures de conductivité thermique par une méthode fluxmétrique. Les matériaux testés sont le béton cellulaire, les bétons biosourcés, la ouate de cellulose et les isolants en fibre de bois. Les résultats sont examinés pour prédire la durée de l'essai conduisant à l'équilibre hygrothermique au sein de l'échantillon, pour évaluer la dépendance expérimentale de la conductivité thermique à l'humidité, pour quantifier les erreurs commises en cas d'interruption prématurée de l'essai et enfin pour tester une méthode permettant de réduire le nombre d'essai.

Mots-clés : transferts hygrothermiques ; conductivité thermique ; méthode fluxmétrique.

Nomenclature

c_p Chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$

x Épaisseur, cm

t Temps, s

T Température, °C

w_m, k, C Paramètres de GAB

Symboles grecs

Φ Humidité relative, %

λ Conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$

θ Teneur en eau volumique, $kg.m^{-3}$

μ Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau, -

ρ Masse volumique, $kg.m^{-3}$

Indices et exposants

eq équilibre

non-éq Hors équilibre

1. Introduction

Les simulations thermiques dynamiques [1] ou les simulations hygrothermiques [2] sont maintenant des pratiques courantes pour évaluer la performance énergétique des bâtiments, le confort thermique ou encore la durabilité des ouvrages. Pour réaliser de tels simulations, renseigner une conductivité thermique des matériaux est nécessaire. Généralement, les valeurs déclarées par les fabricants est utilisée. Cette grandeur est mesurée sous des conditions spécifiques de température ou d'humidité relative, comme précisé dans la norme ISO 10456 [3]. Cependant, il est bien connu que la conductivité thermique des matériaux du bâtiment dépend de la température et de l'humidité relative [4], [5], [6], [7], [8]. Des travaux récents ont montré que prendre en compte ces dépendances peut influencer les résultats de simulation [4], [8], [9], [10]. Par exemple, des écarts allant jusqu'à 70 % dans des conditions hivernales extrêmes [4] et 20 % dans des conditions estivales extrêmes [10] ont été observés sur des flux de chaleur simulés avec une conductivité thermique constante ou dépendante de la température. De même, la prise en compte de la dépendance à l'humidité peut entraîner une modification de la charge de refroidissement allant jusqu'à 25 % [8], [9].

Pour évaluer cette dépendance de la conductivité thermique, la norme ISO 10456 propose d'approximer la conductivité thermique par une fonction exponentielle et des facteurs de conversion. Pour certains matériaux, la norme propose des valeurs pour ces facteurs, dont la validité est questionnée dans la littérature [11], [12]. Pour les autres matériaux, les mesures doivent être menées pour un nombre limité de conditions préconisées [13], [14], [15]. Toutefois, la forme exponentielle de la dépendance à l'humidité est remise en cause et certains auteurs plaident pour un comportement plutôt linéaire [13], [16]. Cela souligne la nécessité d'effectuer un nombre conséquent de mesure de conductivité thermique pour évaluer finement la dépendance à l'humidité de cette dernière.

Pour réaliser ces mesures, deux grandes familles de méthodes existent. Les méthodes transitoires (fil chaud, fil chaud parallèle [17] ou disque chaud) sont couramment utilisées en raison de leur capacité à fournir des résultats d'essai rapides et à perturber le moins possible la distribution de l'humidité à l'intérieur du matériau [18], [19]. La fiabilité de ces méthodes est compromise lors de l'évaluation de matériaux non isotropes [20] ou de matériaux très isolants [21]. En revanche, les méthodes stationnaires (plaque chaude gardée, méthode fluxmétrique HFM) sont plus largement applicables à divers matériaux. Lorsqu'elles sont appliquées à des matériaux humides, une redistribution de l'humidité du côté chaud vers le côté froid se produit au cours de l'essai, induisant des échanges de chaleur latent qui viennent perturber les mesures de flux thermiques de ces équipements. Ces phénomènes qui ont été mis en évidence sur de la fibre de bois [6], [22] et du béton cellulaire [23] impliquent trois choses : 1. Les mesures peuvent être longues ($> 2j$) pour atteindre l'équilibre hygrothermique, 2. Arrêter prématurément l'essai conduit à une surestimation de la conductivité thermique (ce qui peut expliquer les disparités de comportement de la conductivité thermique vis-à-vis de l'humidité dans la littérature), 3. Appliquer des méthodes (telles que proposées dans les normes EN 12664 [24] et ISO 10051 [25]) pour estimer la dépendance à l'humidité de la conductivité thermique à partir d'un essai et de la conductivité thermique sèche peut se révéler intéressant.

Le présent travail s'intéresse à la mesure de la conductivité thermique de plusieurs matériaux isolants bio/géosourcés humides à destination principalement du secteur du bâtiment. Une attention particulière est portée sur l'analyse des temps de mesure, des erreurs commises en cas d'interruption de l'essai et l'applicabilité des méthodes proposées dans les normes EN 12664 [24] et ISO 10051 [25].

2. Matériels et méthodes

Six matériaux d'isolation des bâtiments sont testés :

- Isolation en fibres de bois *IFB* (Pavaflex confort[®]) : ce matériau sous forme de panneau est léger, très perméable [26] et hygroscopique [27]. Comme il a été largement testé dans les travaux précédents [6], il est pris comme référence dans le présent travail.
- Ouate de cellulose *ODC* (fournie par Cellalouate) : ce matériau fabriqué à partir de journaux recyclés présente des fibres plus courtes que le IFB [28]. Il est également léger, perméable et très hygroscopique. Le matériau est testé en vrac.
- Béton de chanvre *BDC* (Isohemp) et terre allégée *TA* (fabriqué au laboratoire [29][30]) : ces deux bétons biosourcés sont constitués de chènevotte de chanvre et d'un liant (chaux et barbotine de terre respectivement). Ces matériaux sont plus denses (200 à 500 kg.m⁻³), légèrement moins hygroscopiques et moins perméables.
- Béton cellulaire *BC* (acheté dans un magasin de bricolage) : ce matériau minéral présentant une structure cellulaire est légèrement moins hygroscopique, moins perméable et plus capillaire que les bétons biosourcés.

- Laine de verre LDV (Isoconfort[®]) : ce matériau fibreux est léger, perméable, mais pas hygroscopique.

Les propriétés hygrothermiques des matériaux sont présentées dans le Tableau 1 et leurs isothermes de sorption sont représentées sur la Figure 1.

Matériau	ρ [kg.m ⁻³]	x [cm]	λ_0 [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	c_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	μ [-]	w_m [%]	C [-]	k [-]
IFB	50	4,0	0,032	1300	2	3,68	13,4	0,94
ODC	35	5,8	0,042	1250	1,5*	4,99	14,4	0,87
BDC	390	7,2	0,072	980	3,5	1,72	19,4	0,9
TA	255	7,1	0,084	1070	3,5	2,47	10,4	0,86
BC	540	5,2	0,152	880	8*	0,76	200	0,9
LDV	23	8,5	0,036	840	1*	1,25*	1086*	0,8*

Tableau 1 : Propriétés hygrothermiques des matériaux (* extrait de la base de données WUFI, le reste est mesuré en laboratoire).

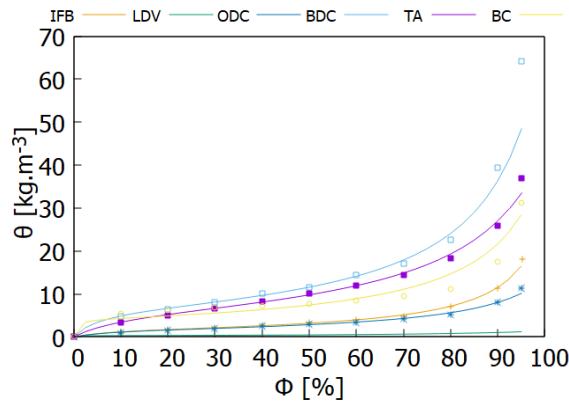


Figure 1 : Isothermes de sorption mesurées pour les matériaux étudiés (points) et ajustées avec le modèle de GAB (ligne).

La conductivité thermique d'échantillons de dimensions de 300 × 300 mm² est mesurée selon la méthode fluxmétrique à l'aide de l'équipement NETZSCH HFM 436. Les échantillons sont conditionnés à 23 °C et à des humidités relatives allant de 0 à 90 %hr. Une fois conditionnés, ils sont instrumentés avec des capteurs sans-fil HygroPuce (6 mm épaisseur et 16 mm de diamètre) pour mesurer toutes les 5 minutes les variations de température et d'humidité relative (avec une précision de 2 %hr et 0,5 °C) au niveau des surfaces supérieures et inférieures et à mi-hauteur. Enfin, les échantillons sont enveloppés d'un film étanche à la vapeur d'eau avec une résistance thermique négligeable pour empêcher les échanges d'humidité avec l'environnement.

Les expériences sont menées à une température moyenne $T_{\text{moyenne}} = 23$ °C et pour une différence de température $\Delta T = 10$ °C. Pour chaque expérience, la mesure se déroule en deux étapes définies dans le logiciel Q-lab : 1. une étape dite « rough » au cours de laquelle les températures des plaques chaude et froide sont ajustées pour respecter les points de consigne, 2. une étape dite « fine » dans laquelle la conductivité thermique est mesurée. Pour cette seconde étape, le logiciel recommande d'arrêter l'essai lorsque la conductivité thermique varie de moins de 0,2 % sur 10 minutes. Toutefois, nos travaux antérieurs [8] ont montré que ces critères n'étaient pas suffisants pour garantir l'atteinte de l'équilibre hygrothermique. Ici,

une variation de la conductivité thermique inférieure à 0,1 % sur 100 minutes a été retenue comme critère pour augmenter la durée du test et améliorer la précision de la mesure.

3. Résultats et analyse

La Figure 2a présente les évolutions temporelles au cours de l'essai de la conductivité thermique normalisée par rapport à la valeur mesurée à l'équilibre des matériaux conditionnés à 23 °C et 80 %rh. On note une baisse rapide au début de l'essai, puis plus lente après quelques heures. Ces évolutions montrent l'impact des transferts latents sur la mesure. En effet, des simulations de ces essais ont été réalisées en négligeant les transferts de masse et montrent que l'équilibre purement thermique est atteint en moins de 2h. Ce résultat est cohérent avec la mesure effectuée sur la LDV, matériau non hygroscopique pour lequel les transferts de masse jouent un rôle négligeable. Pour les matériaux hygroscopiques, le temps d'équilibre hygrothermique dépend des niveaux d'hygroscopicité et de la perméabilité à la vapeur : plus ils diminuent, plus le temps d'équilibre hygrothermique augmente.

La norme EN 12664 [24] suggère que l'équilibre est atteint lorsque la conductivité thermique présente des variations non monotones inférieures à 1 % sur 5 mesures successives à des intervalles Δt (Δt étant estimé à partir de la masse volumique, l'épaisseur, la chaleur spécifique et la résistance thermique de chaque matériau). La Figure 2b présente le temps d'équilibre t_{eq} calculé selon ce critère en fonction de la teneur en eau volumétrique θ pour toutes les expériences. t_{eq} tend à augmenter linéairement avec θ , avec des niveaux qui dépendent du type de matériaux. Pour les matériaux légers (IFB, ODC, LDV), t_{eq} varie entre 7 et 15 heures à l'état sec et environ 40 heures à θ élevée (i.e. conditionnés à 90 %hr). Pour les matériaux plus denses (BDC, TA, BC), t_{eq} varie de 10 à 24 heures à l'état sec à environ 150 heures à θ élevée. Les matériaux testés présentant des épaisseurs caractéristiques différentes, il est toutefois difficile de comparer les temps d'équilibre directement. Cependant, la Figure 2b en fournit une bonne indication qui peut être utile pour la planification d'une campagne d'essai sur des matériaux isolants humides.

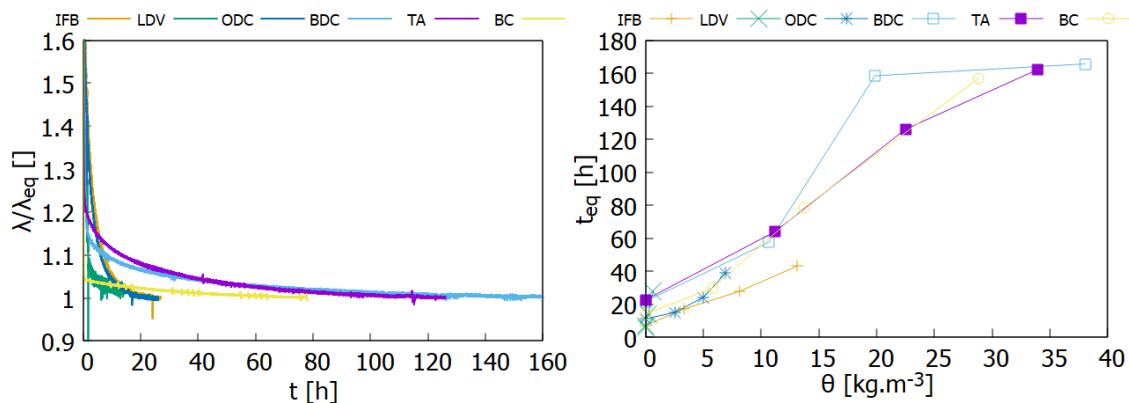


Figure 2 : Évolution temporelle au cours de l'essai de la conductivité thermique normalisée des matériaux conditionnés à 23 °C et 80 %rh (gauche) et durées d'essai après atteinte de l'équilibre hygrothermique pour tous les matériaux sous toutes les conditions (droite).

Les Figures 3a et 3b présentent les évolutions de la conductivité thermique mesurée à l'équilibre λ_{eq} en fonction de la teneur en eau volumétrique θ pour les matériaux légers et denses respectivement. Pour tous les matériaux hygroscopiques, λ_{eq} augmente linéairement avec θ . La loi d'ajustement et le coefficient de corrélation sont rassemblés dans le Tableau 2. On note que la pente varie d'un matériau à un autre sans nécessairement être corrélé à la masse volumique ou à l'hygroscopicité. En revanche, λ_{eq} reste quasiment constant pour LDV

(à $35,8 \pm 0,3 \text{ mW.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Ce matériau n'étant pas hygroscopique, la teneur en eau reste très faible dans le domaine hygroscopique et l'effet sur la conductivité thermique est donc limité, conformément à la littérature [31]. Enfin, la conductivité thermique sèche augmente globalement avec la masse volumique, sauf pour *BDC* par rapport à *TA* : la conductivité thermique sèche des bétons biosourcés est influencée par la structure interne, et en particulier l'orientation des agrégats [20]. Les effets de structure interne prévalent également en comparant *ODC* avec *IFB* et *LFV*.

Les Figures 3a et 3b incluent également la valeur de la conductivité thermique λ_{non-eq} qui aurait été obtenue si l'essai avait été interrompu prématurément conformément aux critères d'équilibre recommandés par le logiciel (lignes pointillées). λ_{non-eq} augmente quasiment linéairement avec θ pour les matériaux hygroscopiques denses, alors qu'une évolution plutôt exponentielle est à observer pour les matériaux hygroscopiques légers. Cela indique que ces derniers sont relativement plus sensibles aux conditions expérimentales de l'essai, en particulier à haute humidité lorsque de l'eau liquide peut apparaître sur la surface froide. Dans tous les cas, λ_{non-eq} est plus élevé que λ_{eq} , traduisant le fait que la chaleur latente n'est pas complètement transférée à travers le matériau. Les écarts entre λ_{eq} et λ_{non-eq} augmentent avec θ , variant de 0 % pour les matériaux secs à 20 % en moyenne pour les matériaux humides (conditionnés à 90 % hr). Ces écarts peuvent expliquer les valeurs diffuses et les comportements variés observés dans la littérature pour une même classe de matériau, soulignant que certaines valeurs ont été obtenues sans que l'équilibre hygrothermique soit atteint. Enfin, on peut noter que ces écarts peuvent également conduire à une incertitude sur la prédiction du comportement hygrothermique d'une paroi contenant ces matériaux isolants, en particulier au niveau des flux thermiques.

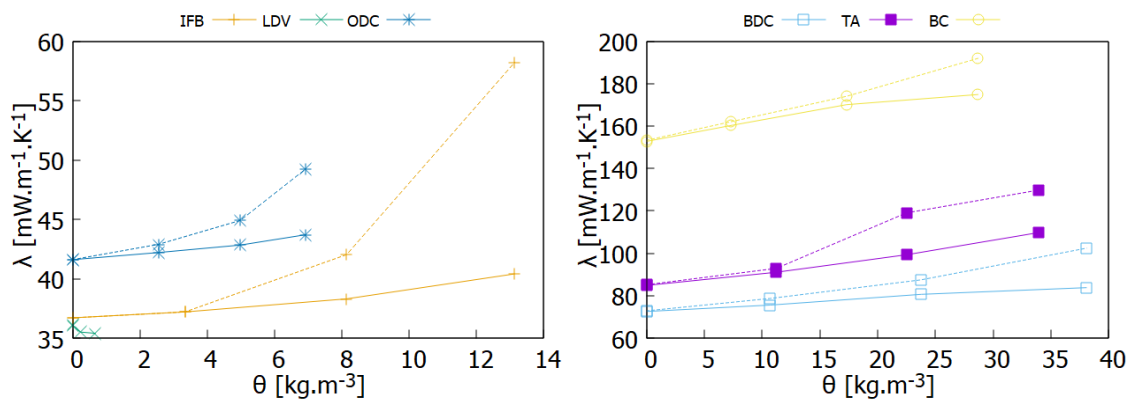


Figure 3 : Conductivité thermique mesurée à l'équilibre λ_{eq} (lignes pleines) et hors équilibre λ_{non-eq} (pointillées) en fonction de la teneur en eau volumique θ pour les matériaux légers (gauche) et denses (droite).

Matériau	$\lambda_{eq}(\theta)$ [mW.m ⁻¹ .K ⁻¹]	R ²	$\lambda_{non-eq}(\theta)$ [mW.m ⁻¹ .K ⁻¹]	R ²
IFB	$0,28 \theta + 36,4$	0,956	$1,62 \theta + 33,6$	0,847
ODC	$0,29 \theta + 41,5$	0,977	$1,05 \theta + 40,8$	0,892
BDC	$0,3 \theta + 72,6$	0,989	$0,77 \theta + 71,3$	0,978
TA	$0,73 \theta + 83,8$	0,988	$1,42 \theta + 82,7$	0,955
BC	$0,78 \theta + 154$	0,963	$1,34 \theta + 152,4$	0,995

Tableau 2 : Lois d'ajustement linéaire des conductivité thermiques λ_{eq} et λ_{non-eq} en fonction de la teneur en eau volumique θ .

Les lois de comportement de λ_{eq} ont été obtenues avec un nombre substantiel d'expérience très chronophages. Pour réduire le temps d'expérimentation, l'annexe E de la norme EN 12664 [24] ou l'annexe C de la norme ISO 10051 [25] proposent une méthode pour évaluer la dépendance linéaire de la conductivité thermique à l'humidité ($\lambda = \lambda_{sec} + a \theta$) à partir de la conductivité thermique sèche λ_{sec} et d'un seul essai réalisé sur un matériau humide. La démarche consiste à poser que la résistance thermique d'un matériau est la somme des résistances thermiques de n tranches d'épaisseur d ayant une teneur en humidité connue θ_i . Il vient alors pour la loi de Fourier à l'équilibre :

$$q = \frac{n(T_{chaud} - T_{froid})}{d \cdot \sum \frac{1}{(\lambda_{sec} + a \cdot \theta_i)}} \quad (2)$$

Pour évaluer la teneur en eau locale sur 20 tranches à l'issue des expériences, des simulations hygrothermiques sont effectuées avec le modèle présenté et validé dans [6]. Les paramètres d'entrée sont ceux présentés dans le Tableau 1 et la conductivité thermique a été fixée à un niveau constant en fonction de la valeur expérimentale mesurée pour chaque essai. Les conditions limites sont celles mesurées par le dispositif HFM, et les conditions initiales sont les températures et l'humidité relative mesurées par les capteurs sans fil. Les pentes a sont calculées systématiquement pour les matériaux conditionnés à des niveaux d'humidité relative de 50 %hr, 80 %hr et 90 %hr.

Matériau	Expérimentale	Calculée at 50 %hr	Calculée at 80 %hr	Calculée at 90 %hr
IFB	0,28	0,18	0,23	0,46
ODC	0,29	0,19	0,35	0,32
BDC	0,296	0,27	0,5	0,46
TA	0,71	0,63	0,68	1,63
BC	0,78	0,93	1,06	1,03

Tableau 3 : Valeurs expérimentales et estimées de la pente a .

Les résultats sont présentés dans le Tableau 3 et comparées aux résultats expérimentaux. Les valeurs de a calculées à 50 ou 80 %hr sont assez proches des valeurs expérimentales, l'incertitude restante étant due à la sensibilité de a aux isothermes de sorption et aux conditions initiales. Les conductivités thermiques évaluées avec ces valeurs de a concordent avec les valeurs mesurées à 5 % près dans le domaine hygroscopique (*i.e.* rh < 85 %rh) et à 10 % près pour rh > 85 %rh. En revanche, les valeurs de a calculées à 90 %hr sont nettement différentes des valeurs expérimentales de a , conduisant à des écarts allant jusqu'à 30 % avec les conductivités thermiques mesurées. Une raison tient dans le fait que le modèle ne tient pas compte des transferts d'eau liquide alors que sa présence est observée expérimentalement au niveau de la plaque froide. Au final, si l'application de la méthode proposée ne pose pas de difficulté majeure dans le domaine hygroscopique, son application aux hautes humidités requière un modèle plus fin ou des techniques expérimentales avancées pour quantifier la teneur en eau localement.

4. Conclusion

La mesure de la conductivité thermique de plusieurs matériaux isolants bio/géosourcés humides par une méthode en régime permanent a été traitée dans cette étude. Les conclusions suivantes ont été tirées :

- Lors d'une mesure, une redistribution de l'humidité se produit au sein du matériau, qui s'accompagne de transfert thermique latent. Le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre hygrothermique est considérablement augmenté pour atteindre 7 jours au maximum. Ce temps dépend de la teneur en eau volumique, de la perméabilité et de l'épaisseur du matériau.
- La conductivité thermique évaluée à l'équilibre hygrothermique augmente linéairement avec la teneur en eau volumique. Un arrêt prématuré de l'essai entraîne une erreur allant jusqu'à 20 % pour des teneurs en eau élevées.
- La méthode proposée par les normes EN 12664 et ISO 10051 pour déterminer la conductivité thermique en fonction de l'humidité à partir d'une seule expérience s'applique sans difficulté majeure dans le domaine hygroscopique, mais requière des développements numériques et/ou expérimentaux à plus haute humidité (> 85 %rh).

L'impact de la précision de la dépendance à l'humidité de la conductivité thermique sur le comportement hygrothermique d'une paroi et/ou d'un bâtiment reste encore à préciser et constitue une perspective à ce travail.

Remerciements

Ces travaux ont bénéficié du support financier de « France Relance » via le projet Décobio et de l'ADEME via le projet Locabati.

Références

- [1] ISO 52016, Energy performance of buildings — Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads (2017).
- [2] EN 15026, Hygrothermal performance of building components and building elements (2008).
- [3] ISO 10456, Building materials and products — Hygrothermal properties — Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values (2007).
- [4] U. Berardi and M. Naldi, The impact of the temperature dependent thermal conductivity of insulating materials on the effective building envelope performance, *Energy Build.*, 144 (2017), 262–275.
- [5] A. A. Abdou and I. M. Budaiwi, Comparison of Thermal Conductivity Measurements of Building Insulation Materials under Various Operating Temperatures, *J. Build. Phys.*, 29 (2005), 171–184.
- [6] M. EL Assaad, T. Colinart, and T. Lecompte, Thermal conductivity assessment of moist building insulation material using a Heat Flow Meter apparatus, *Build. Environ.*, 234 (2023), 110184.
- [7] A. Abdou and I. Budaiwi, The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content, *Constr. Build. Mater.*, 43 (2013), 533–544.
- [8] M. Khoukhi, The combined effect of heat and moisture transfer dependent thermal conductivity of polystyrene insulation material: Impact on building energy performance, *Energy Build.*, 169 (2018), 228–235.
- [9] I. Budaiwi and A. Abdou, The impact of thermal conductivity change of moist fibrous insulation on energy performance of buildings under hot–humid conditions, *Energy Build.*, 60 (2013), 388–399.
- [10] M. Khoukhi, N. Fezzioui, B. Draoui, and L. Salah, The impact of changes in thermal conductivity of polystyrene insulation material under different operating temperatures on the heat transfer through the building envelope, *Appl. Therm. Eng.*, 105 (2016), 669–674.
- [11] L. Gullbrekken, S. Grynning, and J. E. Gaarder, Thermal Performance of Insulated Constructions—Experimental Studies, *Buildings*, 9 (2019), 49.
- [12] A. Korjenic, V. Petránek, J. Zach, and J. Hroudová, Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources, *Energy Build.*, 43 (2011), 2518–2523.
- [13] M. G. Gomes, I. Flores-Colen, L. M. Manga, A. Soares, and J. de Brito, The influence of moisture content on the thermal conductivity of external thermal mortars, *Constr. Build. Mater.*, 135 (2017), 279–286.

- [14] E. Latif, Experimental Analysis of Moisture-Dependent Thermal Conductivity, and Hygric Properties of Novel Hemp-shive Insulations with Numerical Assessment of Their In-Built Hygrothermal and Energy Performance, *Materials*, 17 (2024), 486.
- [15] W. Sonderegger and P. Niemz, Thermal and moisture flux in soft fibreboards, *Eur. J. Wood Wood Prod.*, 70 (2012), 25–35.
- [16] T. Schoch and O. Kreft, The influence of moisture on the thermal conductivity of AAC, *Cement Lime Concrete*, 16 (2011), 44–48.
- [17] Y. Jannot, H. M. Bal, and C. Moynes, Influence of Mass Transfer on the Estimation of the Thermal Conductivity of a Wet Material by the Hot Wire and Parallel Hot Wire Methods, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 202 (2023), 123732.
- [18] Y. Wang, K. Liu, Y. Liu, D. Wang, and J. Liu, The impact of temperature and relative humidity dependent thermal conductivity of insulation materials on heat transfer through the building envelope, *J. Build. Eng.*, 46 (2022), 103700.
- [19] M. Jerman and R. Černý, Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials, *Energy Build.*, 53 (2012), 39–46.
- [20] T. Colinart, M. Pajeot, T. Vincelas, A. Hellouin De Menibus, and T. Lecompte, Thermal conductivity of biobased insulation building materials measured by hot disk: Possibilities and recommendation, *J. Build. Eng.*, 43 (2021), 102858.
- [21] Q. Zheng, S. Kaur, C. Dames, and R. S. Prasher, Analysis and improvement of the hot disk transient plane source method for low thermal conductivity materials, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 151 (2020), 119331.
- [22] D. Florez, P. Perré, C. Segovia, and R. Rémond, Computational characterisation of the heat flow meter method applied to moist bio-based insulating building materials, *Int. J. Therm. Sci.*, 201 (2024), 109038.
- [23] M. Campanale, M. Deganello, and L. Moro, Effect of Moisture Movement on Tested Thermal Conductivity of Moist Aerated Autoclaved Concrete, *Transp. Porous Media*, 98 (2013), 125–146.
- [24] EN 12664, Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods (2001).
- [25] ISO 10051, Thermal insulation — Moisture effects on heat transfer — Determination of thermal transmissivity of a moist material (1996).
- [26] T. Colinart, and P. Glouannec. Accuracy of water vapor permeability of building materials reassessed by measuring cup's inner relative humidity, *Build. Environ.*, 217 (2022), 109038.
- [27] J. Berger, T. Colinart, B. R. Loiola, and H. R. B. Orlande, Parameter estimation and model selection for water sorption in a wood fibre material, *Wood Sci. Technol.*, 54 (2020), 1423–1446.
- [28] L. M. Thieblesson, F. Collet, S. Prétot, C. Lanos, H. Kouakou, and O. Boffoue, Elaboration and Characterization Of Eco-Materials Made From Recycled Or Bio-Based Raw Materials, *Energy Procedia*, 139 (2017), 468–474.
- [29] T. Colinart, T. Vincelas, H. Lenormand, A. H. D. Menibus, E. Hamard, and T. Lecompte, Hygrothermal properties of light-earth building materials, *J. Build. Eng.*, 29 (2020), 101134.
- [30] T. Vincelas, T. Colinart, E. Hamard, A. Menibus, T. Lecompte, and H. Lenormand, Light Earth Performances For Thermal Insulation: Application To Earth–Hemp. *Earthen Dwellings and Structures: Current Status in their Adoption* (2019), 357–367.
- [31] M. K. Kumaran, Moisture Transport Through Glass-Fibre Insulation in the Presence of a Thermal Gradient, *J. Therm. Insul.*, 10 (1987), 243–255.