

Influence des transferts de masse sur la mesure de la conductivité thermique des isolants biosourcés hygroscopiques

Machhour EL ASSAAD*¹, Thibaut COLINART¹, Thibaut LECOMPTE¹

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

*** machhour.el-assaad@univ-ubs.fr**

RESUME. Il est nécessaire d'optimiser la mesure de la conductivité thermique pour améliorer l'estimation de la consommation énergétique des bâtiments. L'effet de la migration de l'humidité sur la mesure de la conductivité thermique des matériaux humides est examiné au cours d'un test HFM. Tout au long de l'essai, l'humidité se déplace du côté chaud au côté froid, ce qui entraîne une distribution non uniforme de l'humidité et soulève des questions telles que : Que mesurons-nous exactement, s'agit-il de la conductivité thermique correcte, et quelles conséquences remarquerons-nous si les conditions limites et les conditions de test sont modifiées ? Pour répondre à ces questions, des études sont menées sur des isolants en fibre de bois conditionnés à différentes humidités relatives. Des capteurs sans fil de température et d'humidité relative sont placés à différents endroits à l'intérieur et à la surface des matériaux pendant l'essai HFM. Le suivi permet d'évaluer l'influence du transfert d'humidité pendant le test. Les données expérimentales sont comparées aux résultats simulés fournis par un modèle de transfert de chaleur et d'humidité pour bien comprendre comment les champs d'humidité se redistribuent et influencent le flux de chaleur.

MOTS-CLÉS : essais HFM, transport d'humidité, transfert thermique, conductivité thermique, fibre de bois.

ABSTRACT. Further optimization of thermal conductivity measurement is required to improve the estimation of building energy consumption. The effect of moisture migration on the thermal conductivity measurement of wet materials is examined during an HFM test. Throughout the test, moisture will migrate from the hot to the cold side, resulting in a non-uniform moisture distribution, presenting questions such as: What exactly are we measuring, and is this the correct thermal conductivity, and what consequences will we notice if the boundary and testing conditions are altered? Investigations are carried out on wood fiber insulation conditioned at different relative humidities to resolve these concerns. Wireless temperature and relative humidity sensors are placed at various locations inside and on the surfaces of the materials during the HFM test. The monitoring allows assessing the influence of moisture transfer during the test. The experimental data are compared to simulated results provided by a heat and moisture transfer model to fully understand how moisture fields redistribute and influence heat flow.

KEYWORDS: HFM test, moisture migration, heat transfer, thermal conductivity, wood fiber insulation.

1. INTRODUCTION

Les isolants biosourcés sont amenés à être de plus en plus utilisés, tant dans la construction neuve sous l'impulsion de la RE2020 qu'en rénovation, notamment du patrimoine ancien. En vue de prédire la performance et la tenue en service des enveloppes des bâtiments, la connaissance de la conductivité thermique est requise. Cette dernière est actuellement mesurée à l'aide de méthodes stationnaires (HeatFlowMeter, plaque chaude gardée) sur des matériaux secs, conformément au protocole Acermi. Toutefois, il s'avère également nécessaire d'évaluer sa dépendance à l'humidité du fait du caractère hygroscopique de ces matériaux. Dans ce cas, le gradient de température imposé lors de l'essai peut

induire une migration de l'humidité au cours de l'expérience : des transferts latents se produisent et perturbent la mesure.

(Becker and Katz 1990) ont proposé une méthode pour corriger la conductivité thermique apparente en évaluant la redistribution de la teneur en eau au cours d'un essai. Cette méthode a été appliquée à des bétons avec des densités allant de 340 à 2240 kg.m⁻³. Les auteurs ont démontré que l'effet de la redistribution de l'humidité sur la conductivité thermique n'était pas significatif pour les échantillons testés. En revanche, ils suggèrent que ce n'est pas le cas lorsque le rapport entre la diffusivité de la vapeur et la conductivité hydraulique du matériau diminue. (Campanale, Deganello, and Moro 2013) ont évalué l'influence du mouvement de l'humidité sur la mesure de la conductivité thermique du béton cellulaire conditionné à une humidité relative élevée en calculant l'erreur entre la conductivité thermique mesurée par le HFM et une conductivité thermique réelle (définie pour une distribution uniforme de l'humidité et sans considérer le flux de chaleur latente supplémentaire produit par la migration de l'humidité). Il apparaît que l'erreur due au changement de phase n'est significative que dans les premières phases de l'essai, tandis que l'erreur due à la dispersion de l'humidité augmente avec le temps et a un signe négatif. Ils ont également conclu que pour une humidité relative inférieure à 80 %HR et une différence de température inférieure à 10 °C, l'erreur totale causée par la migration de l'humidité est inférieure à 1 %. (Wang et al. 2018) ont proposé une méthode de calcul pour déterminer la conductivité thermique effective de matériaux comme le béton, la brique d'argile ou le béton cellulaire sur la base des équations décrivant les transferts couplés de chaleur et d'humidité. La température et la vapeur d'eau de l'air intérieur sont respectivement de 25 °C et 1000 Pa. Lorsque la pression de la vapeur d'eau à l'extérieur passe de 1000 Pa à 4000 Pa, et la température de 25 °C à 40 °C, il y a une augmentation de 1,2*10⁶ kg.m⁻².s⁻¹ et de 0,8*10⁶ kg.m⁻².s⁻¹ dans le flux d'humidité causé par le gradient de pression de vapeur et le gradient de température respectivement pour un échantillon du béton. Par conséquent, la conductivité thermique supplémentaire causée par la migration de l'humidité augmente. Toutefois, ces trois études se sont focalisées sur des matériaux denses pour lesquels la migration de l'humidité n'est pas suffisamment importante pour induire une variation significative de la conductivité thermique. Concernant les matériaux isolants à plus faible densité, une approche différente est rencontrée dans la littérature : les échantillons (généralement de la laine de verre) sont humidifiés avec de l'eau liquide sur une de ses faces avant essai dans un HFM (pour simuler un apport ponctuel d'eau due à une fuite par exemple) et la redistribution de l'humidité et son influence sur les températures et les flux de chaleur sont analysés (Langlais, Silberstein, and Sanberg 1994)(Thomas, Bal, and Onega 1983)(Kumaran 1987)(Wijeysundera, Hawlader, and Tan 1989) (Wijeysundera and Hawlader 1992)(Hokoi and Kumaran 1993). Ces études ont montré que l'humidité projetée sur une surface est entièrement redistribuée lorsqu'elle est soumise à une différence de température du côté chaud au côté froid. Toutefois, cette redistribution est beaucoup plus longue pour ce type d'essai par rapport à un conditionnement initial homogène, ce qui accroît le risque d'erreur lors de la mesure.

Ce travail vise à mieux comprendre l'influence de la migration de l'humidité lors la mesure de la conductivité thermique d'un isolant hygroscopique de faible densité et à évaluer les effets de la teneur en eau et des conditions opératoires. Pour cela, une campagne expérimentale est menée à l'aide d'un appareil de type HFM et les résultats sont analysés à l'aide d'un modèle de transferts couplés de chaleur et d'humidité.

2. PROCEDURE EXPERIMENTAL

L'échantillon testé est un isolant en fibre de bois d'une épaisseur de 40 mm et d'une densité sèche de 50 kg.m^{-3} . Avant d'être testé, l'échantillon a été conditionné jusqu'à l'équilibre à 23 °C et à différentes humidités relatives comprises entre 0, 50, 80 et 90 %HR. Cinq petits capteurs sans fil (HygroPuce de Waranet, dimensions : 6 mm d'épaisseur et 16 mm de diamètre, précision : 2 %HR et $0,5 \text{ °C}$) ont été placés à différentes positions à cœur et en surface du matériau pour mesurer les variations de température et d'humidité relative pendant le test (figure 1 (a)). L'échantillon testé a été emballé dans un sac en polyéthylène imperméable pour éviter tout échange d'humidité avec l'environnement. L'échantillon a ensuite été placé à l'intérieur de l'appareil HFM pour mesurer sa conductivité thermique. Ici, les expériences sont réalisées à des températures moyennes comprises entre 10, 23 et 40 °C . Dans cette optique, les températures chaude et froide ont été réglées pour assurer une différence de température de 10 °C ou 20 °C . Les températures mesurées par l'appareil HFM sont représentées sur la figure 1 (b).

Pendant l'expérience, les flux de chaleur sont mesurés des deux côtés de l'échantillon et les variations de la conductivité thermique peuvent être évaluées à l'aide de la loi de Fourier. Pour une température moyenne donnée et une différence de température donnée, les expériences se déroulent en deux étapes jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint pour la conductivité thermique : la première étape « rough » exige une variation de 1 % de la conductivité thermique pendant 10 lectures consécutives (chaque minute) et ensuite, l'étape « fine » requière une variation de moins de 0,1 % pendant 25 lectures consécutives (chaque minute). Ce second critère est plus contraignant que les valeurs recommandées par le fournisseur (0,2 % pour 10 lectures consécutives), mais moins contraignant que celui imposé par la norme ISO 12664 (1 % sur 4h).

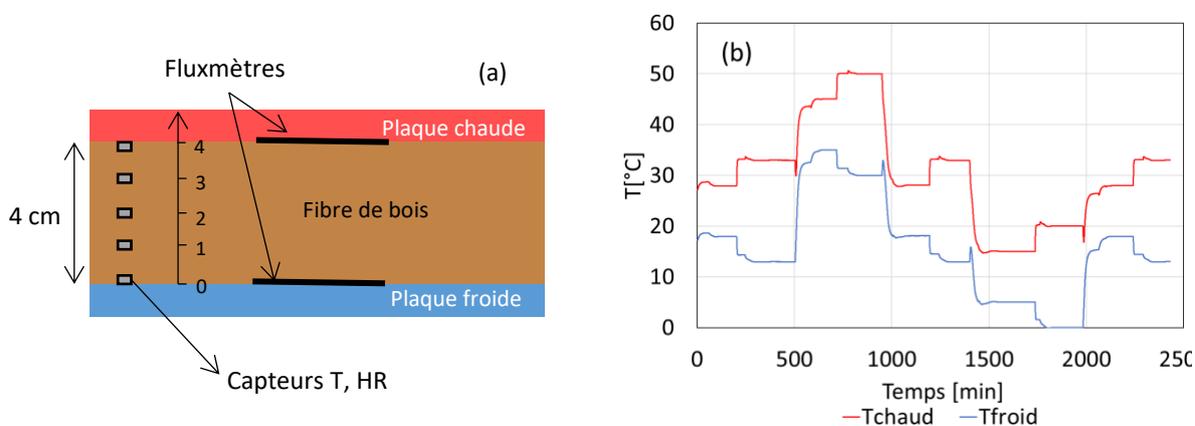


Figure 1 : (a) Présentation du dispositif expérimental. (b) Températures mesurées pour les plaques chaude et froide.

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

La figure 2 montre les évolutions de températures et du flux thermique en surface (fig. 2 (a)) et d'humidité relative dans le matériau initialement conditionné à 80 %HR (fig. 2 (b)) au cours d'un essai réalisé à une température moyenne de 23 °C avec une différence de température de 10 °C . Avant l'essai, le champ d'humidité relative est homogène dans le matériau (fig. 2(b)). De 0 à 110 minutes, les températures chaudes et froides sont ajustées pendant l'étape « rough » afin de respecter les points de

consigne. Les flux de chaleur mesurés sur les plaques chaudes et froides tendent à s'équilibrer, sauf lorsque les températures de la plaque changent ponctuellement. Dans le même temps, l'humidité relative a tendance à diminuer près de la plaque chaude et à augmenter près de la plaque froide, ce qui montre que l'humidité est redistribuée dans le matériau du côté chaud au côté froid pendant le test. Une fois les points de consigne de température atteints, les flux de chaleur mesurés au niveau des plaques chaude et froide sont presque égaux et diminuent lentement en raison du transfert de chaleur latente. En effet, l'humidité continue à être redistribuée et l'humidité relative ne semble pas avoir atteint l'équilibre, en particulier près de la plaque chaude. L'essai se poursuit jusqu'à ce que les critères d'équilibre soient atteints pour la conductivité thermique. Ici, l'étape « fine » dure environ 400 minutes, et la durée totale du test est de 538 minutes (environ 9 heures). Notons cependant que l'équilibre hygrothermique n'est pas atteint à la fin de cette séquence expérimentale.

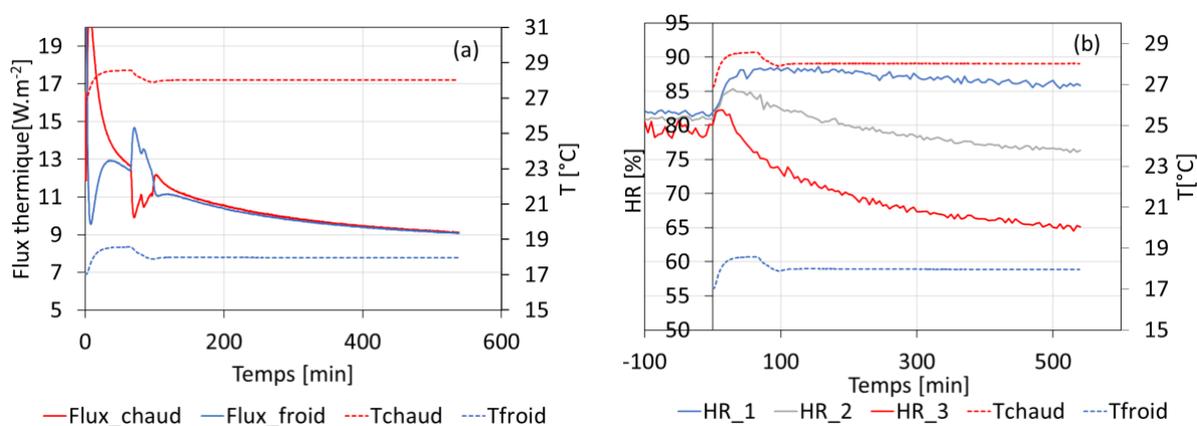


Figure 2 : Variations mesurées des flux de chaleur et des températures des plaques chaude et froide (a) et de l'humidité relative à différentes positions (b) pour le matériau conditionné à 80 % HR.

La figure 3 présente les variations d'humidité relative mesurées dans l'échantillon conditionné à 50 %HR (fig. 3(a)) et 80 %HR (fig. 3 (b)) pour différentes températures moyennes et différentes différences de température. Les durées totales de chaque test sont résumées dans le tableau 1. Premièrement, des comportements similaires sont observés pour les échantillons conditionnés à 50 et 80 %HR ; la seule différence réside dans les niveaux d'humidité relative. Cependant, la cinétique de redistribution de l'humidité dans l'échantillon est plus lente à plus forte humidité et la durée totale du test peut passer de 78 à plus de 900 minutes. Deuxièmement, la température moyenne n'affecte pas significativement le champ d'humidité relative et, d'ailleurs, aucune tendance claire n'est observée sur la durée globale du test. Enfin, la différence de température exerce une influence importante sur la redistribution de l'humidité relative. Plus la différence de température est élevée, plus la différence d'humidité relative (et donc de teneur en eau) entre le côté chaud et le côté froid est importante. De plus, cette différence augmente lorsque l'humidité relative moyenne à l'intérieur du matériau augmente. Cependant, pour l'échantillon conditionné à 80 %HR, l'équilibre hygrothermique semble ne pas être atteint pour chaque condition de température (en particulier lorsque $\Delta T = 20$ °C) alors que les critères d'équilibre définis dans le dispositif sont respectés. Néanmoins, on note des durées plus courtes lorsque $\Delta T = 20$ °C (par rapport à $\Delta T = 10$ °C) : l'humidité est déjà redistribuée après le test réalisé avec $\Delta T = 10$ °C, et la durée correspond plutôt au temps de re-redistribution lorsque ΔT passe de 10 à 20 °C.

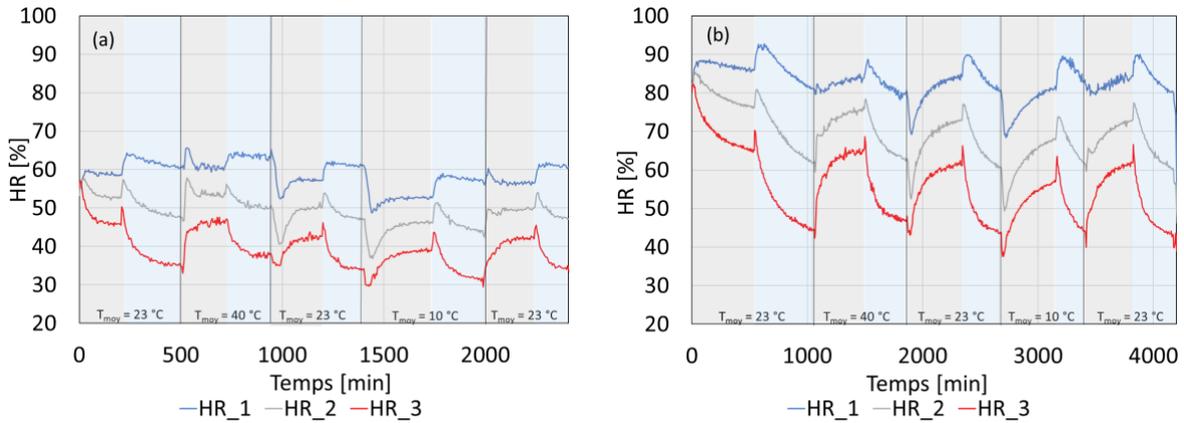


Figure 3 : Variations d'humidité relative mesurées dans le matériau conditionné à 50 %HR (a) et 80 %HR (b) (les zones grises et bleues représentent les essais avec un ΔT de 10°C et 20°C respectivement).

	0 %HR		50 %HR		80 %HR		90 %HR	
	$\Delta T = 10$	$\Delta T = 20$	$\Delta T = 10$	$\Delta T = 20$	$\Delta T = 10$	$\Delta T = 20$	$\Delta T = 10$	$\Delta T = 20$
10 °C	166	78	327	244	473	255	512	374
23 °C (1)	181	129	204	295	538	521	844	909
23 °C (2)	175	115	243	210	472	339	703	472
23 °C (3)	215	144	266	189	410	351	533	479
40 °C	142	115	215	234	433	371	550	535

Tableau 1: Temps (en minutes) pour atteindre les critères d'équilibre.

Les conductivités thermiques mesurées lorsque le critère d'équilibre défini dans le dispositif est atteint sont représentées sur la figure 4 (a) en fonction de la température moyenne et de l'humidité relative pour $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ et en fonction de la différence de température et de l'humidité relative pour $T_{\text{moyenne}} = 23^\circ\text{C}$ sur la figure 4 (b). Comme prévu, la conductivité thermique augmente avec la température et l'humidité relative moyenne. D'autre part, la conductivité thermique augmente avec la différence de température ΔT , en particulier pour les échantillons humides. L'équilibre hygrothermique n'étant pas atteint lorsque les flux de chaleur répondent aux critères d'équilibre définis dans le dispositif, les valeurs évaluées pour une humidité relative moyenne élevée et pour $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ sont probablement surestimées. Enfin, en comparant les trois mesures réalisées pour $T_{\text{moyenne}} = 23^\circ\text{C}$ et $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, on constate que la première est plus élevée que les deux autres : l'humidité n'est pas complètement redistribuée au sein de l'échantillon à partir d'un état initial homogène (contrairement aux deux autres mesures). Elle conduit à une conductivité thermique plus élevée (voir tableau 2), la différence étant la plus importante pour l'échantillon humide. Ces premières valeurs n'ont pas été prises en compte lors du tracé de la fig. 4 (a).

Conductivité thermique ($T_{\text{moyenne}}=23^\circ\text{C}$, $\Delta T=10^\circ\text{C}$)	0 %HR	50 %HR	80 %HR	90 %HR
Première valeur	0,0323	0,0336	0,0371	0,0426
Autres valeurs	0,0322	0,0328	0,0331	0,0342

Tableau 2 : Valeurs de conductivité thermique enregistrées pour $T_{\text{moyenne}}=23^\circ\text{C}$ et $\Delta T=10^\circ\text{C}$.

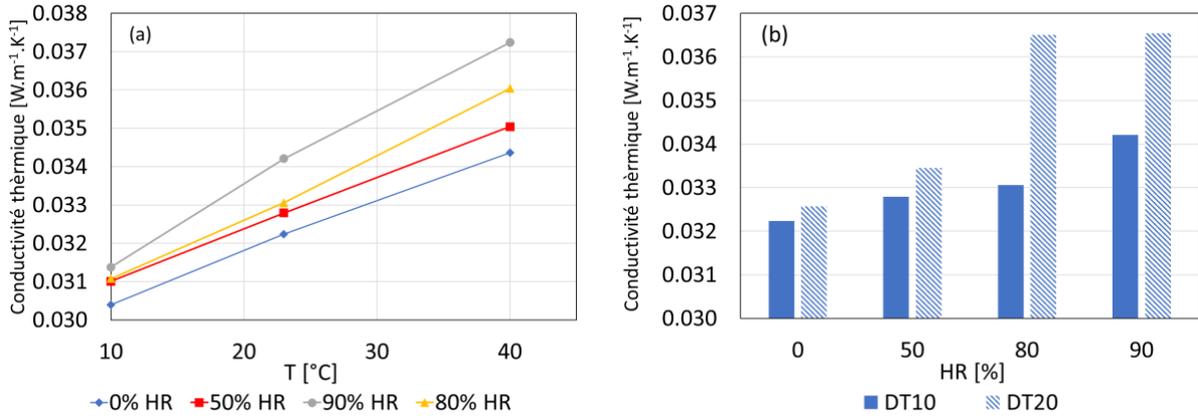


Figure 4 : Conductivité thermique évaluée en fonction de la température moyenne et de l'humidité relative pour $\Delta T = 10$ °C (a) et en fonction de la différence de température et de l'humidité relative pour $T_{moyenne} = 23$ °C (b).

4. ÉQUATIONS DE TRANSFERT DE CHALEUR ET D'HUMIDITE

Des simulations hygrothermiques transitoires sont réalisées avec le modèle de Kunzel (Kunzel 1995) pour étayer les observations expérimentales. En négligeant les transferts de liquide et en prenant la température T et l'humidité relative HR comme potentiels moteurs, les équations décrivant les transferts de chaleur et d'humidité dans les matériaux sont écrites :

$$C_{eq} \frac{dT}{dt} = \nabla(-\lambda \nabla T + K L_v) \quad (1)$$

$$\rho_s \frac{dw}{dHR} \frac{dHR}{dt} = \nabla((D_v^{HR} \nabla HR + D_v^T \nabla T)) \quad (2)$$

où C_{eq} [J.m⁻³.K⁻¹] est la capacité thermique volumétrique, $\lambda = aT + bw + c$ [W.m⁻¹.K⁻¹] la conductivité thermique dépendant de la température et de la teneur en eau (avec a , b , et c des paramètres ajustés expérimentalement), K et L_v le taux et la chaleur latente du changement de phase, ρ_s [kg.m⁻³] la densité sèche, w [] la teneur en eau. Enfin, D_v^{HR} et D_v^T sont respectivement les coefficients de diffusion de la vapeur et de thermo-diffusion de la vapeur. Plusieurs des coefficients sont recensés dans le Tableau 3.

C_{eq}	K	L_v
$\rho_s * (C_{p_s} + w C_{p_l})$	$D_v^{HR} \nabla HR + D_v^T \nabla T$	$L_v(T_{ref}) + (C_{p_v} - C_{p_l})(T - T_{ref})$
w	D_v^{HR}	D_v^T
$\frac{0.63HR}{(1 - 1.03HR)(1 + 14.7HR)}$	$\frac{D_v^0 M_v P v_{sat}(T)}{\mu RT}$	$\frac{D_v^0 M_v}{\mu RT} HR \left(\frac{dP v_{sat}(T)}{dT} - \frac{P v_{sat}(T)}{T} \right)$

Tableau 3 : Coefficients de stockage et de transfert des équations de conservation.

où C_{ps} , C_{pv} et C_{pl} [J.kg⁻¹.K⁻¹] sont les capacités thermiques du matériau (1300), de la vapeur d'eau (1870) et de l'eau liquide (4180) respectivement. $L_v = 2450$ [kJ.kg⁻¹] est la chaleur latente d'évaporation de l'eau. $D_v^0 = 0,0000217 * (T/273,15)^{1,88}$ [m².s] est le coefficient de diffusion binaire de la vapeur d'eau. $M_v = 0,018$ [kg.mol⁻¹] est la masse molaire de la vapeur d'eau. $\mu = 2$ [] est le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau. $R = 8,314$ [J.mol⁻¹.K⁻¹] est la constante des gaz parfaits et enfin P_{vsat} [Pa] est la pression de vapeur d'eau saturée.

Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics®. En ce qui concerne les conditions aux limites, les températures représentées sur la figure 1 (b) ont été choisies.

Pour la condition initiale, une température de 23 °C et une humidité relative homogène (dépendant des conditions de chaque essai) ont été retenues.

5. RESULTATS NUMERIQUES

La figure 5 (a) montre l'évolution expérimentale et numérique des champs d'humidité relative pour un échantillon conditionné à 80 %RH. Les courbes en pointillés représentent les valeurs expérimentales, tandis que les courbes pleines représentent les valeurs simulées. L'évolution simulée de l'humidité relative présente les mêmes variations que celles de l'expérience, sans qu'il y ait une correspondance parfaite entre les deux. Cependant, comme notre modèle est assez simple, l'accord reste acceptable.

Afin de valider la fiabilité de la mesure HFM d'un matériau hygroscopique humide, une simulation à long terme est réalisée sur un échantillon conditionné à 80 %HR avec $T_{\text{moyenne}} = 23 \text{ °C}$ et $\Delta T = 10 \text{ °C}$. Le flux thermique moyen simulé (moyenne des deux côtés de l'échantillon) est représenté sur la figure 5 (b) et comparé aux valeurs mesurées. Malgré quelques différences, la cinétique est similaire. Notons que la durée nécessaire pour atteindre l'équilibre hygrothermique est supérieure à 60 heures, ce qui est significativement plus élevé que la durée expérimentale (9 heures). Interrompre l'essai prématurément conduit dans ce cas à une surestimation de 7 % de la conductivité thermique. En guise de comparaison le flux thermique moyen prédit par un modèle purement thermique est également tracé. L'équilibre thermique est atteint très rapidement. La différence entre les simulations thermiques et hygrothermiques met en évidence les effets de la chaleur latente pendant l'expérience HFM.

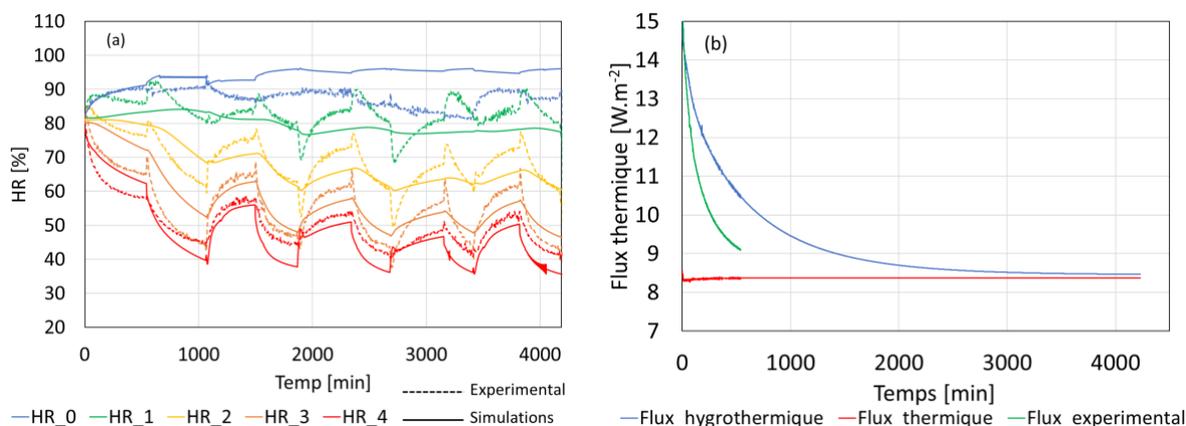


Figure 5 : (a) Évolutions mesurées et simulées de l'humidité relative pour le matériau conditionné à 80 %HR. (b) Variations expérimentales et simulées du flux thermique prédites par les modèles thermiques et hygrothermiques.

6. CONCLUSION

Cette étude a évalué l'effet de la migration de l'humidité sur la mesure de la conductivité thermique d'un isolant hygroscopique en fibre de bois conditionné à 0, 50, 80, 90 %HR au travers d'expériences instrumentées et de simulations numériques. Une redistribution de l'humidité a été observée pendant l'expérience, ce qui a influencé les flux de chaleur à la surface de l'échantillon. Ces effets latents sont renforcés lorsque la différence de température et l'humidité relative moyenne de l'échantillon sont augmentées. Par conséquent, l'équilibre hygrothermique peut ne pas être atteint lorsque les critères d'équilibre définis dans le dispositif sont respectés, et la conductivité thermique peut être surestimée pour les échantillons humides.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Becker, Rachel, and Amnon Katz. 1990. 'Effect of Moisture Movement on Tested Thermal Conductivity of Moist Materials'. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2 (2): 72–83. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1990\)2:2\(72\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1990)2:2(72)).
- Campanale, M., M. Deganello, and L. Moro. 2013. 'Effect of Moisture Movement on Tested Thermal Conductivity of Moist Aerated Autoclaved Concrete'. *Transport in Porous Media* 98 (1): 125–46. <https://doi.org/10.1007/s11242-013-0136-z>.
- Hokoi, S., and M.K. Kumaran. 1993. 'Experimental and Analytical Investigations of Simultaneous Heat and Moisture Transport through Glass Fiber Insulation'. *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes* 16 (3): 263–92. <https://doi.org/10.1177/109719639301600307>.
- Kumaran, M.K. 1987. 'Moisture Transport Through Glass-Fibre Insulation in the Presence of a Thermal Gradient'. *Journal of Thermal Insulation* 10 (4): 243–55. <https://doi.org/10.1177/109719638701000405>.
- Künzel, Hartwig M. 1995. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and Two-Dimensional Calculation Using Simple Parameters*. Stuttgart: IRB Verlag.
- Langlais, Catherine, anne Silberstein, and ingvar Sanberg. 1994. 'Effects of Moisture on the Thermal Performance of Insulating Materials'. In *Moisture Contrile in Buildings*. 'NF EN 12664'. n.d. Afnor EDITIONS. Accessed 25 February 2022. <https://www.boutique.afnor.org/en-gb/standard/nf-en-12664/thermal-performance-of-building-materials-and-products-determination-of-the/fa045168/18797>.
- Thomas, WC, GP Bal, and RJ Onega. 1983. 'Heat and Mass Transfer in Glass Fiber Insulating Materials'. *ASTM STP* 789: 562–601.
- Wang, Yingying, Chao Ma, Yanfeng Liu, Dengjia Wang, and Jiaping Liu. 2018. 'Effect of Moisture Migration and Phase Change on Effective Thermal Conductivity of Porous Building Materials'. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 125 (October): 330–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.062>.
- Wijeysundera, N. E., and M. N. A. Hawlader. 1992. 'Effects of Condensation and Liquid Transport on the Thermal Performance of Fibrous Insulations'. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 35 (10): 2605–16. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(92\)90102-X](https://doi.org/10.1016/0017-9310(92)90102-X).
- Wijeysundera, N. E., M. N. A. Hawlader, and Y. T. Tan. 1989. 'Water Vapour Diffusion and Condensation in Fibrous Insulations'. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 32 (10): 1865–78. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(89\)90158-0](https://doi.org/10.1016/0017-9310(89)90158-0).