

Impact du transfert simultané masse-chaueur dans la mesure de la conductivité thermique d'isolants biosourcés

FLOREZ Daniela¹, STEPHAN Antoine¹, RÉMOND Romain¹

¹ LERMAB, Université de Lorraine, ENSTIB, 88051 Epinal, France
daniela-carolina.florez-parra@univ-lorraine.fr

Mots clefs : conductivité thermique ; isolant de fibres de bois ; transferts masse-chaueur ; méthode fluxmétrique ; simulation numérique

Contexte et objectifs

La conductivité thermique des matériaux et produits pour le bâtiment est évaluée à l'aide de méthodes en régime permanent du type plaque chaude gardée et fluxmétrique, ou en régime transitoire à travers des techniques telles que le fil chaud et le hot-disk. Dans le cas des matériaux biosourcés hygroscopiques, comme par exemple les panneaux isolants en fibres de bois, la conductivité thermique apparente perçue par les appareils de mesure diffère selon le régime de la méthode utilisée. Actuellement, ces produits sont caractérisés par une méthode en régime permanent conforme à la norme EN 13171. Cependant, à ce jour, il ne semble y avoir un consensus sur la méthode la plus appropriée.

La méthode en régime transitoire consiste à chauffer l'échantillon localement de manière unidirectionnel suivant son épaisseur et sur un temps relativement court (inférieur à 30 min). Grâce à cette rapidité, le champ d'humidité dans l'échantillon est peu affecté. En revanche, dans la mesure en régime permanent, l'échantillon est soumis à une différence de température qui induit un flux thermique à travers son épaisseur jusqu'à atteindre l'état stationnaire (plusieurs heures). Au cours de cette mesure, le profil d'humidité au sein de l'échantillon est modifié et l'apparition des transferts simultanés de chaleur et de masse influencent la mesure de la conductivité thermique, contrairement à la mesure en régime transitoire plus courte.

La contribution dans cette communication consiste d'une part, à simuler une expérience de type méthode fluxmétrique couramment utilisée pour la mesure de la conductivité thermique de panneaux isolants en fibres de bois. D'autre part, à quantifier l'effet des transferts simultanés de chaleur et de masse sur ce type de mesure et à travers l'évaluation des paramètres tels que la teneur en eau locale, la densité et l'épaisseur du produit.

Méthodes

Mesure de la conductivité thermique (λ) par la méthode fluxmétrique

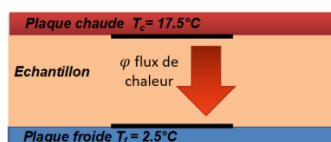


Fig. 1 : Méthode fluxmétrique de mesure de la conductivité thermique en régime stationnaire

Le principe de cette méthode consiste à placer un échantillon d'épaisseur e au contact entre une plaque chaude (de température T_c) et une plaque froide (de température T_f) et de mesurer le flux de chaleur induit ϕ . Le maintien des conditions aux limites constantes ($T_c - T_f$) permet d'effectuer la mesure en régime permanent (Fig. 1). Les conditions expérimentales sont menées

de manière à avoir un transfert de chaleur monodimensionnel dans la zone centrale de l'échantillon où est mesuré le flux. Des transducteurs de flux sur les plaques permettent de quantifier la densité du flux de chaleur traversant l'échantillon.

Une fois l'état stationnaire atteint au niveau thermique, la conductivité thermique apparente λ_{app} est déterminée par l'équation (1) :

$$\lambda_{app} = \frac{\varphi \cdot e}{(T_c - T_f)} \quad (1)$$

Calcul de la conductivité thermique locale du milieu fibreux

La conductivité thermique locale λ_{loc} va dépendre des fractions volumiques des différentes phases, solide (s), liquide (l), gaz (g) présentes dans le matériau et de leur conductivité respective λ_i . En intégrant toute la complexité de la morphologie du milieu poreux dans une constante μ , la conductivité locale du milieu a pu être estimée par une loi de mélange par Louërat et al. (2017) pour les panneaux de fibres de bois et par Perré et Turner (2001) pour l'Épicéa (équation 2) :

$$\lambda_{loc} = \left(\varepsilon_g \lambda_g^\mu + \varepsilon_s \lambda_s^\mu + \varepsilon_l \lambda_l^\mu \right)^{\frac{1}{\mu}} \quad (2)$$

Typiquement, les valeurs du λ de chaque phase utilisées dans le calcul sont respectivement $\lambda_g=0.023$ W/m.K, $\lambda_s=0.5$ W/m.K et $\lambda_l=0.6$ W/m.K (Siau 1995 ; Ngoe-Ekam *et al.* 1994). Les fractions volumiques sont évaluées en utilisant les expressions de Perré et Turner (2001). Selon le type de matériau, le facteur μ peut varier entre 0.22 pour des panneaux type MDF et jusqu'à 0.6 pour le bois massif (Louërat et al. 2018, Perré et Turner 2001). Pour une même gamme de matériaux (bois massif ou panneaux de fibres ou particules, etc.), le facteur μ est ajusté en minimisant l'écart entre les valeurs des mesures expérimentales de conductivité thermique et celles prédites par la loi de mélange.

Simulation numérique de la méthode fluxmétrique

La simulation des transferts masse-chaleur dans l'isolant en suivant le mode opératoire de la mesure de type fluxmétrique selon la norme EN 12667 et de la certification ACERMI a été effectuée. Le modèle numérique *TransPore* (Perré et Turner 1999) dans sa version unidimensionnelle a été utilisé avec l'implémentation de la loi de mélange précédente. Les résultats de mesure sont déterminés à 10°C avec des conditions aux limites de Dirichlet imposées aux niveaux des plaques de $T_c=17.5^\circ\text{C}$ et $T_f=2.5^\circ\text{C}$.

La valeur de flux de l'équation (1) est déterminée dès que le critère de régime stationnaire thermique est atteint. La conductivité thermique apparente peut ensuite être estimée via la même équation. Le matériau est supposé isolé au niveau des échanges de vapeur d'eau (flux massiques nuls) avec son environnement extérieur, de manière à avoir une humidité globale du panneau constante au cours de l'essai.

Différentes densités et épaisseurs d'isolants ont été testées. Chaque résultat de λ_{app} est comparé à une configuration sans transfert massique simultanée ($\lambda_{intrinsèque}$), c.à.d. sans gradient d'humidité lors de l'expérience.

Résultats et discussion

Dans la Figure 2 sont représentés les résultats de la simulation d'une expérience de mesure de type méthode fluxmétrique pour un panneau en fibres de bois de 35mm d'épaisseur, 150 kg/m³ de densité et 7.5% de teneur en eau initiale (masse d'eau/masse de matière sèche). Cette teneur en eau correspond à l'humidité en équilibre d'un panneau conditionné avant essai à 20 °C et 50% d'humidité relative. Les conditions non-isothermes induisent une redistribution de l'humidité dans le panneau avec un flux d'humidité allant du côté chaud vers le côté froid de l'isolant qui suit le gradient de pression partielle de vapeur. La Figure 2a montre le séchage du côté de la source chaude ($e = 35$ cm) et l'humidification du côté de la source froide ($e = 0$ cm).

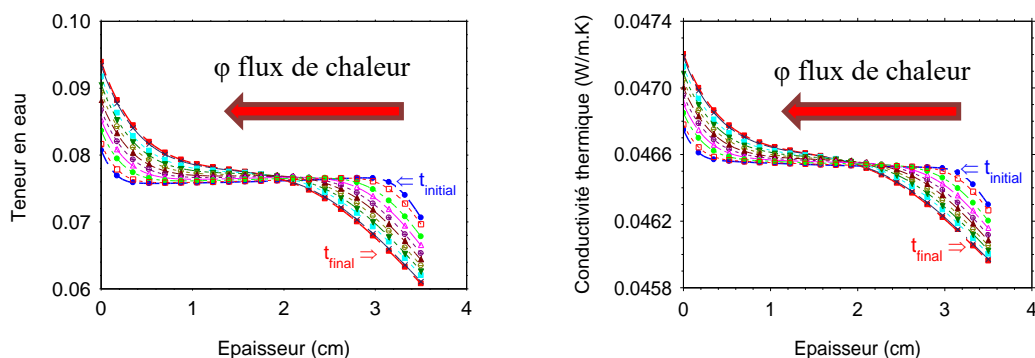


Fig. 2 : Evolution du champ de teneur en eau (à gauche) et de la conductivité thermique locale (à droite) dans l'épaisseur d'un panneau lors de la mesure fluxmétrique. Les différentes courbes montrent l'évolution depuis le début ($t_{\text{initial}}=0$) et jusqu'à la fin de la mesure (t_{final}) où le système a atteint l'état stationnaire.

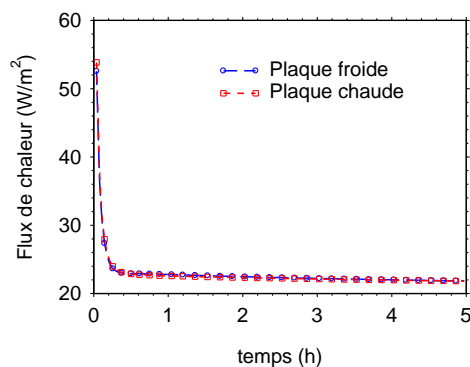


Fig. 3 : Flux de chaleur au niveau des plaques (en valeur absolue) pendant la mesure fluxmétrique.

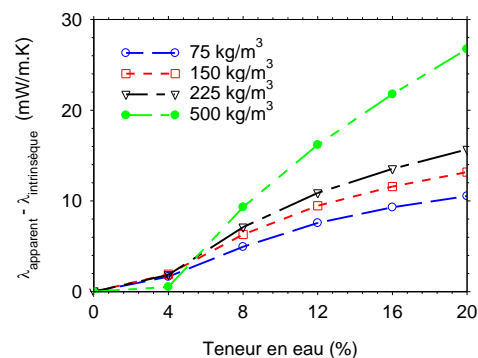


Fig. 4 : Surestimation de la conductivité thermique ($\lambda_{\text{app}} - \lambda_{\text{intrinsèque}}$) de panneaux de fibres de bois de densité et de teneur en humidité initiale différentes. Prédictions obtenues par une simulation de type méthode fluxmétrique.

Au bout de 5 heures (t_{final}), le champ d'humidité évolue du profil plat initial (t_{initial} , 7.5% d'humidité) vers un gradient d'humidité allant de 6% à 9.5% entre les deux plaques. En raison de sa dépendance avec l'humidité via l'équation 2, il y a également un profil de conductivité thermique (Figure 2b). La Figure 3 montre les flux de chaleur perçus au niveau des plaques (en valeur absolue). La conductivité thermique « apparente » est estimée lorsque le critère d'état stationnaire thermique est atteint (Eq.1).

Effet de la densité et de la teneur en eau sur la mesure de λ

La variation de λ_{app} des panneaux de fibres avec différentes densités (75, 150, 225, 500 kg.m⁻³) et 6 cm d'épaisseur, a été modélisée pour des teneurs en eau initiales comprises entre 0 et 20%. L'ampleur de l'impact du transfert de masse sur le transfert de chaleur est quantifiée ici par la différence entre λ_{app} et $\lambda_{intrinsèque}$. Les valeurs de $\lambda_{intrinsèque}$ (sans gradient d'humidité) pour chaque densité sont reportées dans le Tableau 1.

Comme il est constaté dans la Figure 4, l'effet du transfert massique de vapeur d'eau conduit à une surestimation de la conductivité thermique qui est d'autant plus importante que la teneur en eau et la densité sont élevées. Sur la plage de teneur en eau étudiée, cette surestimation semble varier entre 5.6% et 26% selon la densité (75 - 500 kg.m⁻³). D'autres simulations ont démontré qu'en augmentant de 6 cm à 12 cm l'épaisseur d'un panneau de 150 kg/m³ et 6% de teneur en eau initiale, la conductivité thermique serait surestimée de 1.1 mW.m⁻¹.K⁻¹.

Tab. 1 : λ « intrinsèque » de panneaux de fibres de bois de différentes densités ($e = 6$ cm)

Masse volumique (kg.m ⁻³)	75	150	225	500
$\lambda_{intrinsèque}$ (mW.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0.029	0.037	0.047	0.108

Conclusion et perspectives

L'impact des transferts simultanés de chaleur et d'humidité apparaissant lors de l'expérience de type fluxmétrique a été étudié dans ce travail pour des isolants hygroscopiques tels que les panneaux de fibres de bois. Les simulations montrent que la conductivité thermique apparente mesurée par le fluxmètre est surestimée par rapport sa valeur intrinsèque d'autant plus que le produit testé est dense, épais, et que sa teneur en eau initiale avant le test est élevée La modélisation a permis de quantifier cet effet à travers quelques exemples concrets et la validation expérimentale de ces résultats est dans la perspective de travaux à venir.

Remerciements

Ce travail bénéficie d'un financement de l'ADEME dans le cadre du projet BIP (*Building Material Insulation Performance*) (AAP Graine, ed.2019) et de la région Grand Est et du FEDERER-FSE Lorraine et Massif des Vosges dans le cadre du projet Soprano'tex.

Références

Louërat, M., M. Ayouz, et P. Perré. (2018) Heat and Moisture Diffusion in Spruce and Wood Panels Computed from 3-D Morphologies Using the Lattice Boltzmann Method. *International Journal of Thermal Sciences* 130, 471–83.

Ngoe-Ekam P.S., D., Lecomte and G. Menguy. 1994. Thermal conductivity of tropical wood: influence of moisture, cutting lever and principal cutting plan. 9th International Drying Symposium, published in *Drying* 94, 751-758.

Perré, P., Turner, I. W. (1999). A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media. *International Journal of heat and mass transfer*, 42(24), 4501-4521.

Perré, P., and Turner, I. (2001) Determination of the Material Property Variations Across the Growth Ring of Softwood for Use in a Heterogeneous Drying Model Part 1. Capillary Pressure, Tracheid Model and Absolute Permeability. *Holzforschung* 55, no. 3,318–23.

Siau, J. F. (1995). Wood: Influence of moisture on physical properties. Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University.