

Influence du taux d'humidité dans les isolants thermiques en fibre de bois et méthodologie de mesure

Alain KOENEN¹, Damien MARQUIS^{1*}

¹Laboratoire national de métrologie et d'essai (LNE), 29 avenue Roger Hennequin, 78197 Trappes Cedex

Résumé - L'humidité contenue dans les matériaux hygroscopiques a un effet sur la mesure de la conductivité thermique. L'étude présentée porte sur plusieurs matériaux en fibre de bois conditionnés à 23 °C à plusieurs taux d'humidité. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'une plaque chaude gardée de référence métrologique à une température moyenne de 10 °C avec plusieurs gradients de température compris entre 5°C et 30 °C. L'importance de la migration de l'eau des zones chaudes vers les zones froides est corrélée avec la conductivité thermique apparente mesurée et au gradient de température appliqué. Des critères de mesure ont été proposés pour réduire la migration de l'humidité afin d'obtenir des résultats plus fiables. Les résultats de ces travaux devraient être intégrés dans la prochaine révision des normes EN 12667 et EN 12664.

Nomenclature

d	épaisseur, mm	$\lambda_{23/50}$	conductivité thermique après conditionnement à 23°C et 50 % HR, $W.m^{-1}.K^{-1}$
T	température, °C	$\lambda_{10,sec}$	conductivité thermique à l'état sec mesuré à 10°C, $W.m^{-1}.K^{-1}$
F_m	facteur de correction de l'humidité	f_ψ	coefficient de conversion d'humidité volumique, %
<i>Symboles grecs</i>		ψ_i	teneur en humidité en volume, %
ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$		
ΔT	écart de température entre les plaques, °C		

1. Introduction

La mesure de la conductivité thermique des matériaux hygroscopique est complexe notamment parce qu'elle combine deux phénomènes couplés le transfert de chaleur et de masse. Les mesures de conductivité sont effectuées avec une plaque chaude gardée ou un appareil à fluxmètre dont le principe est d'imposer un flux de chaleur entre 2 plaques à deux températures différentes. Lors de la mesure, l'humidité peut migrer de la plaque chaude vers la plaque froide de l'équipement de mesure. On constate que l'effet de l'humidité sur les valeurs de conductivité thermique apparentes peut atteindre plusieurs pourcents et qu'il dépend du flux de chaleur. Ces transferts ont été étudiés par plusieurs auteurs, notamment Philip et De Vries [1], Krischer [2].

En Europe, le marquage CE des produits isolants thermiques du bâtiment qui permet de mettre les produits sur le marché et de comparer les produits doit être déterminé à 10 °C sur un produit conditionné à 23 °C et 50 % HR. Il est ainsi important que des critères de mesures soient clairement définis afin d'éviter de mesurer des valeurs trop différentes d'un laboratoire à l'autre.

Aujourd'hui sur le marché, les produits hygroscopiques les plus utilisés sont la fibre de bois produite à partir de pins et la ouate de cellulose produite à partir de papier recyclé.

Cet article propose d'étudier la relation entre la conductivité thermique apparente et la teneur en humidité sur les produits en fibre de bois et comment l'humidité migre dans le produit pendant la mesure.

2. Equipement d'essai et méthodologie d'essai

La méthode de la plaque chaude gardée (EN 12667 [3]) détermine les propriétés de transmission thermique en régime permanent de produits ayant une faible conductivité thermique. La méthode d'essai standard pour la plaque chaude gardée (PCG) utilise l'équation de conductivité thermique unidimensionnelle en régime permanent pour la détermination de la conductivité thermique. Dans le cas présent, les mesures ont été réalisées à l'aide d'une PCG de référence métrologique à deux éprouvettes de 600 mm de côté (figure 1) et dont la zone de mesure est de 300mm de côté. L'incertitude globale de cet équipement sur des matériaux non hygroscopiques est de l'ordre de 1%. Ici, on prendra 1 % pour l'erreur de justesse à laquelle il faut ajouter l'erreur de fidélité.

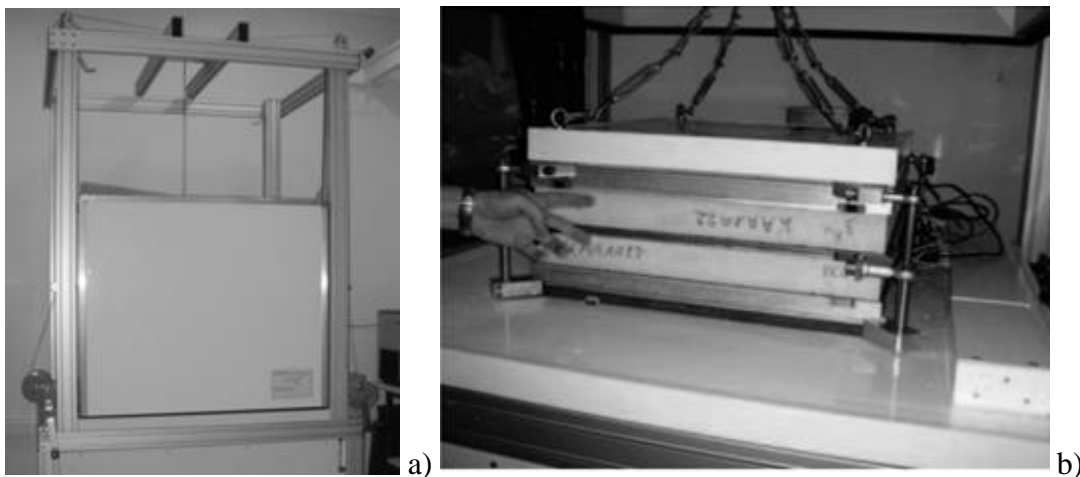


Figure 1 : Image de la PCG vu de l'extérieur (a), Intérieur 2 échantillons positionne entre la plaque chaude et les 2 plaques froides (b)

3. Description des échantillons d'essai

Les isolants en fibre de bois (WF [4]) sont produits à partir de pins d'Europe. Pour les tests présentés ici, les fibres de bois ont été produites par 4 fabricants différents. La gamme de densité est comprise entre 50 et 190 kg/m³. En dessous de 60 kg/m³, le matériau est souple et s'utilise en toiture ou en mur entre ossature en bois. Pour des densités supérieures à 130 kg/m³, le matériau n'est pas compressible et peut supporter des charges. Le tableau 1 résume les différents matériaux utilisés pour les mesures.

<i>Désignation</i>	<i>Fabricant</i>	<i>Description</i>	<i>Densité</i> <i>kg/m³</i>	<i>Epaisseur</i> <i>mm</i>
WF1a - WF1f	A	Basse densité WF	60	40 - 140
WF2a - WF2d	B	Haute densité WF	130 - 190	100
WF3	A	Moyenne densité WF	90	100
WF4	C	Haute densité WF	150	100
WF5	A	Haute densité WF	130	50

Tableau 1 : produits testés

4. Effet de l'humidité sur la conductivité thermique apparente du matériau d'isolation thermique

La conductivité thermique apparente des panneaux de fibres de bois augmente avec la teneur en humidité. La norme EN ISO 10456 [5] propose une méthode de conversion des valeurs thermiques d'un ensemble de conditions, par exemple séché, à un autre ensemble de conditions, par exemple humide à 23 °C et 50 % HR. L'effet de l'humidité sur la conductivité thermique apparente est supposé suivre l'équation suivante :

$$\lambda_{humide} = \lambda_{sec} \cdot F_m$$

F_m est le facteur de correction de l'humidité en en volume par volume

$$F_m = e^{f_\psi(\psi_2 - \psi_1)}$$

_ f_ψ est le coefficient de conversion d'humidité volumique

_ ψ_1 est la teneur en humidité en volume du premier ensemble de condition

_ ψ_2 est la teneur en humidité en volume du deuxième ensemble de conditions

Par ailleurs, pour les fibres de bois, la norme européenne EN 13171 précise que la conductivité thermique apparente doit être déclarée à une température moyenne de 10 °C après conditionnement dans une atmosphère à (23 ± 2) °C et (50 ± 5) % d'humidité relative. Ceci permet d'utiliser la mesure de la conductivité thermique apparente sur produit sec pour déterminer la conductivité thermique apparente correspondant à une atmosphère de conditionnement de (23 ± 2) °C et (50 ± 5) %HR. Ainsi la conductivité thermique à 10 °C d'un produit conditionné à 23°C et 50%HR se calculerait à partir de la conductivité à 10°C d'un produit séché de la façon suivante :

$$\lambda_{10,23/50} = \lambda_{10,sec} e^{f_\psi(\psi_{23,50})} \quad (1)$$

_ $\lambda_{10,sec}$ est la conductivité thermique mesurée selon l'EN 12667 après conditionnement à l'état sec de référence (éprouvettes stockées pendant 72 h à (70 ± 3) °C dans une étuve jusqu'à stabilisation en masse) ;

_ $\psi_{23,50}$ est la teneur en humidité de l'éprouvette après stockage à (23 ± 2) °C et (50 ± 5) %HR jusqu'à stabilisation en masse ;

5. Protocole

Trois séries de tests ont été effectués sur la fibre de bois pour évaluer l'effet de l'humidité sur la mesure de la conductivité thermique apparente. Dans le cas présent les mesures ont été réalisées pour évaluer l'effet de la teneur en humidité dans le matériau, l'influence du gradient de température pendant la mesure et les phénomènes de la migration de l'humidité pendant la mesure.

5.1. 1ere étape : effet du taux d'humidité

La conductivité thermique apparente de la fibre de bois a été mesurée avec différentes teneurs en humidité, sèche, après conditionnement à 23°C - 50 %RH (noté par la suite 23/50), et état humide après conditionnement 23°C - 85 %RH (noté 23/85).

Pour l'état sec, les échantillons ont été séchés à 70 °C dans une étuve ventilée et régulée à (70 ± 3) °C jusqu'à ce qu'un écart inférieur à 0,1 % en poids soit observé entre 3 pesées espacées de 24 heures conformément à l'EN ISO 12570 [6].

Pour les états humides à 23/50 et 23/85 les éprouvettes sont conditionnées respectivement dans une atmosphère à (23 ± 2) °C et (50 ± 5) %HR ou à (23 ± 2) °C et (85 ± 5) %HR pendant au moins une semaine jusqu'à l'obtention d'un écart de poids inférieur à 0,05 % entre 2 pesées effectuées à 24 heures d'intervalle.

5.2. Deuxième étape : effet du gradient thermique

Au cours de cette étape, les conductivités thermiques mesurées ont été réalisées avec plusieurs écarts de température (ΔT) entre la plaque froide et la plaque chaude de 10 à 30 K. Il est à noter que les mesures ont été effectuées sur des éprouvettes non tranchés.

5.3. Troisième étape : effet de la migration d'eau pendant la mesure

La dernière étape a été réalisée sur des échantillons tranchés. Deux configurations ont été testées.

Sur la première configuration chaque tranche a été pesée avant et après mesure pour évaluer la migration de l'eau pendant la mesure. Pendant la mesure, les échantillons ont été emballés dans un sac en plastique hermétique pour éviter les échanges d'humidité avec l'air extérieur. Dans cette configuration, l'eau peut migrer de la plaque chaude vers la plaque froide (Figure 3 a).

Sur la deuxième configuration, un film de polyéthylène (PE) a été placé entre chaque tranche pour éviter la migration de l'eau de la plaque chaude vers la plaque froide. Chaque tranche a été pesée avant et après la mesure (Figure 3 b).

Le tableau 2 donne un aperçu des différentes conditions d'essais qui ont été réalisées.

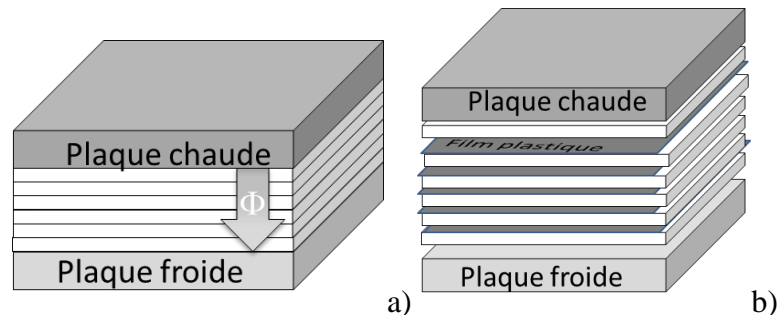


Figure 2 : . a) mesure avec éprouvettes tranchée sans film de PE entre les tranches et b) avec film de PE en les tranches

n°	Etape	Désignation	d mm	ρ kg/m ³	ΔT °C	Conditionnement °C/%RH
1	Influence du taux d'humidité	WF1a à WF1f et WF5	40–140	60	10	sec, 23/50, 23/85
2	Influence du ΔT	WF2a à WF2d	50	130	de 5 à 30	sec, 23/50, 23/85
3	effet de la migration de l'eau	WF3 WF4	100	130 – 190	15	sec, 23/50

Tableau 2 : liste des différentes configurations testées

6. Résultats et analyses

6.1. première étape : effet du taux d'humidité

Deux matériaux de densité différentes, 60 et 140 kg/m³, ont été testés. Avant la mesure de la conductivité thermique à l'état sec, tous les échantillons WF1a à 1f ont été stockés à 70 °C jusqu'à ce qu'ils atteignent la stabilité de masse. Ils ont été pesés puis mesurés en PCG. Après la mesure, ils ont été de nouveau conditionnés à 23/50 dans une enceinte climatique puis pesés et mesurés. La même procédure a été suivie pour le climat à 23/85.

La masse de l'échantillon augmente d'environ 6% après un conditionnement à 23/50 et entre 16 et 18% après le conditionnement à 23/85 (Figure 4 a). En volume, l'humidité représente environ 0,4 % à 23/50 et 1 % à 23/85 (Figure 4 b). Il n'y a pas d'influence claire de l'épaisseur sur la teneur en humidité en masse.

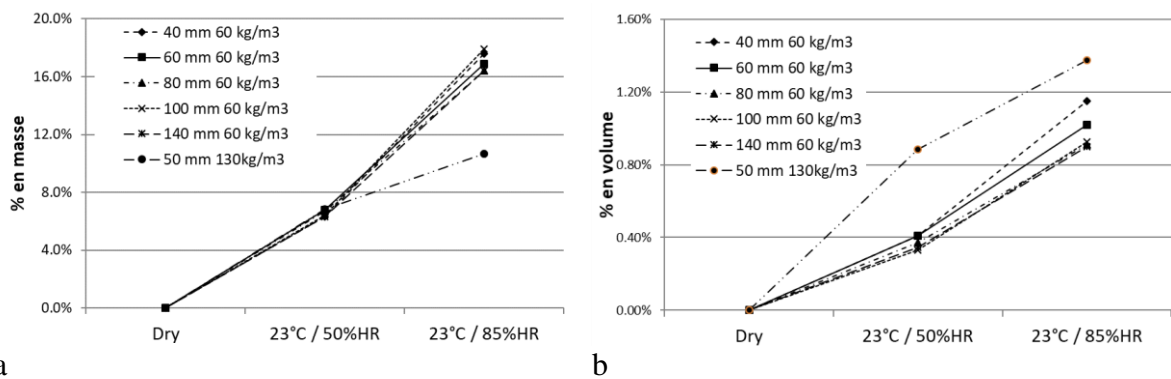


Figure 3 : taux d'humidité dans le produit en fibre de bois WF 1a - 1f à différentes conditions a) en masse b) en volume

La conductivité thermique apparente augmente de 1 à 2 % entre l'état sec et l'état humide 23/50 et de 6 à 10 % entre l'état sec et l'état humide 23/85 (Figure 5a). Pour chaque configuration le f_{ν} a été calculé (figure 5b). La tendance est à une augmentation de sa valeur avec la quantité d'humidité contenue dans le produit.

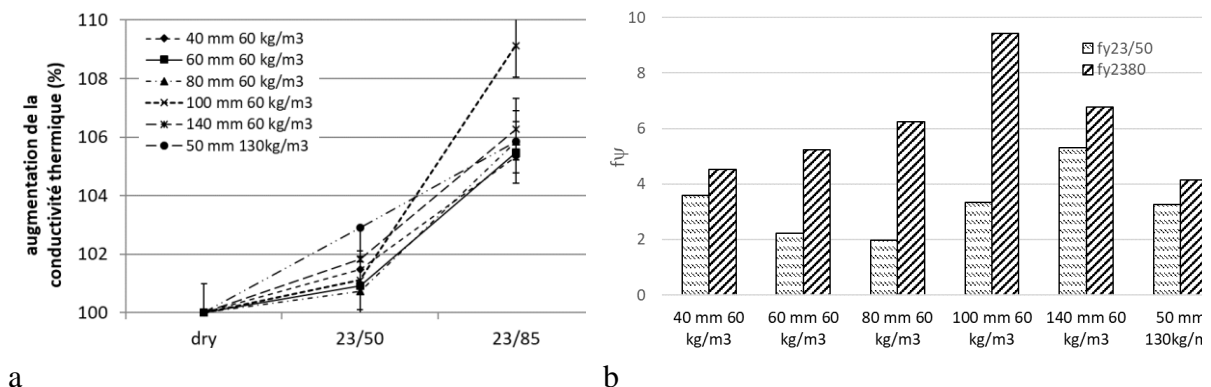


Figure 4 : a) Evolution de la conductivité thermique apparente des produits WF 1a - 1f à différentes conditions, b) f_{ν} de chaque produit

6.2. Deuxième étape : effet du gradient thermique

Les conductivités thermiques apparentes des 4 échantillons WF2a–2d de densités différentes et en équilibre avec une atmosphère à 23/50 ont été mesurées. Chaque échantillon a été placé dans la PCG. Sur les produits non hygroscopiques tels que les plastiques alvéolaires ou les laines minérales, lorsque le ΔT est compris entre 5 et 30 K, il n'induit aucune influence sur le résultat de la mesure. Ici, sur la fibre de bois, le ΔT a une grande influence sur la conductivité thermique apparente où les plus faibles ont été mesurées avec le ΔT le plus faible. La conductivité thermique apparente est liée à l'écart de température entre la plaque chaude et les plaques froides. Il ressort également que les résultats dépendent fortement de la masse volumique apparente. La conductivité peut varier jusqu'à 10% pour le produit à 132 kg/m³ (Figure 6). L'effet du gradient thermique devient plus significatif lorsque la masse volumique augmente.

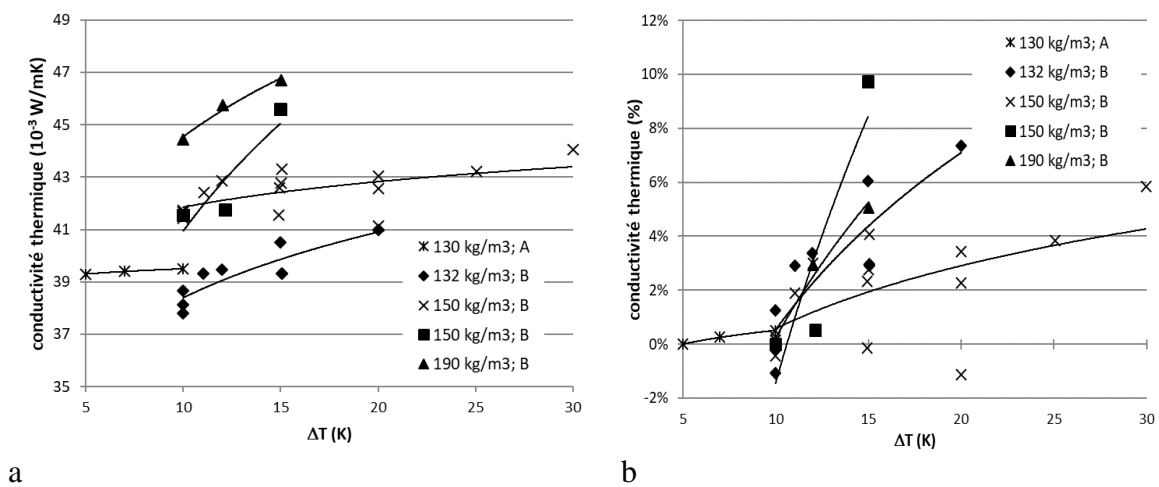


Figure 6 : Evolution de la conductivité thermique apparente des produits WF 2a - 2d et WF5 avec le ΔT a) valeurs en 10^{-3} W/(m.K) b) valeurs en pourcent.

6.3. Troisième étape : effet de la migration d'humidité durant la mesure

Cette partie étudiée, la migration de l'humidité pendant la mesure.

Le premier essai a été mené sur le produit WF3. Le produit a été tranché dans l'épaisseur en 5 couches. La masse de chaque couche de l'échantillon tranché a été mesurée à l'état sec, après conditionnement à 23/50 et après la mesure de conductivité thermique à la PCG. De l'état sec à l'état humide, chaque couche absorbe 7 % d'humidité. La conductivité thermique apparente a été mesurée à $36,6 \cdot 10^{-3} \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à l'état sec et à $37,2 \cdot 10^{-3} \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à l'état humide. L'humidité augmente la conductivité thermique apparente d'environ 2 %, ce qui est proche du niveau que nous avons observé lors de la première étape.

La masse de chaque couche a été mesurée après la mesure de conductivité thermique. Il apparaît que les couches proches de la plaque chaude perdent entre 4 et 5 grammes du fait de la migration de l'humidité et les couches proches des plaques froides gagnent, quant à elles, entre 5 et 6 grammes pour la même raison (figure 7).

Le second test a été mené sur le produit WF4 en intercalant des films en PE entre chaque couche pour empêcher la migration de l'humidité lors de la mesure thermique. Ce processus permet de déterminer l'influence de l'humidité indépendamment de sa migration sur les valeurs de la conductivité thermique.

De l'état sec à l'état humide, le produit gagne 7% en masse d'humidité. La première série de mesure a été réalisée en plaçant des films en polyéthylène entre chaque couche de fibres de bois afin d'éviter la migration de l'humidité. Ensuite, les films ont été retirés pour la seconde série de mesure pour permettre à l'eau de migrer librement de la plaque chaude vers la plaque froide. Comme sur les produits WF3 la migration représente 1% de la masse (Figure 8 et Figure 9).

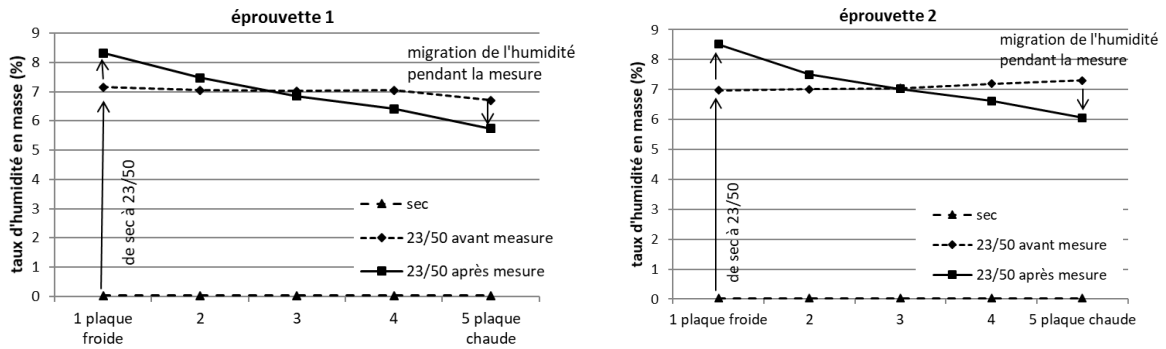


Figure 7 : Variation en pourcentage de la masse de chaque couche du produit WF3 due à l'humidité et à sa migration pendant la mesure

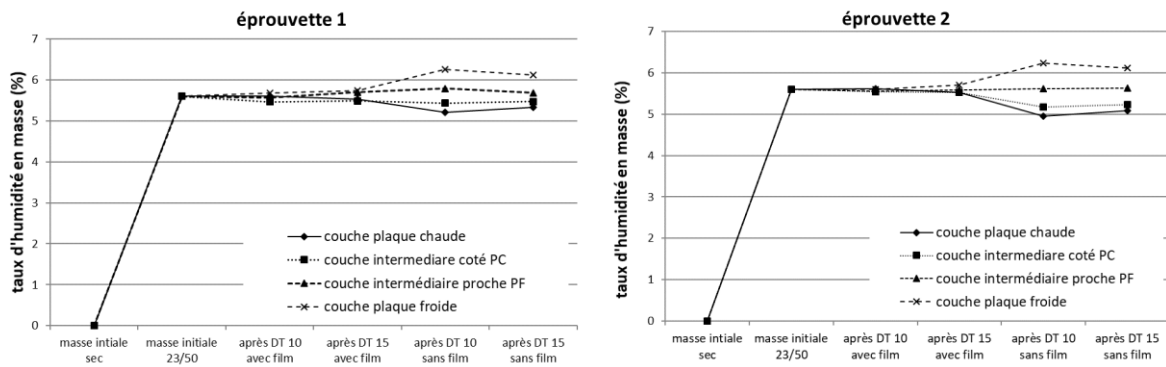


Figure 8 : Variation de la masse de chaque couche en pourcent du produit WF4 due à l'humidité et à sa migration pendant la mesure

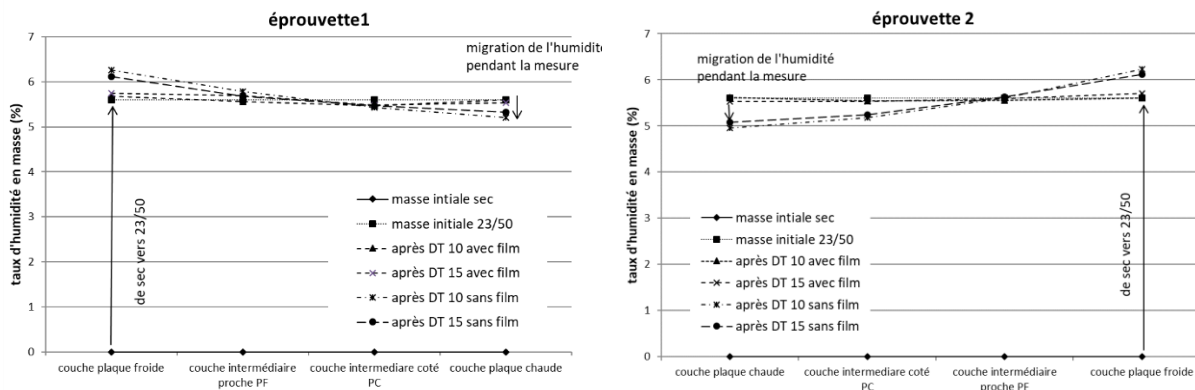


Figure 9 : Variation en pourcent de la masse de chaque couche du produit WF4 due à l'humidité et sa migration pendant la mesure

L'humidité augmente la conductivité thermique apparente de 2% à partir de l'état sec, 1 % est attribué à la migration de l'eau (Figure 10).

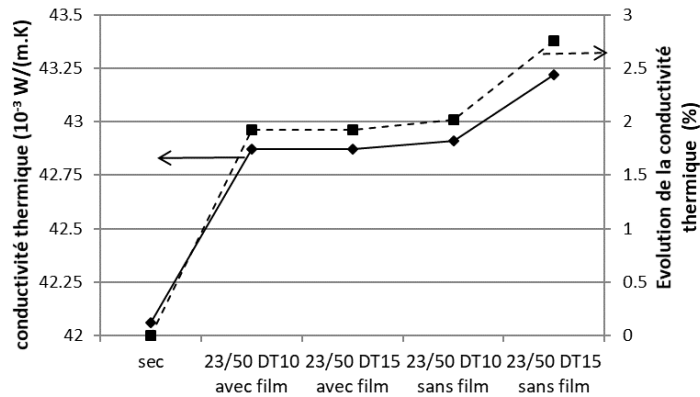


Figure 10 : Conductivité thermique apparente du produit WF4 selon les configurations

7. Conclusion

Cet article s'est concentré sur l'effet des propriétés hygrothermiques de certains matériaux d'isolation thermique en fibre de bois et sur leur influence sur les résultats de mesures de la conductivité thermique. L'étude a montré une augmentation de la conductivité thermique apparente avec la teneur en eau au sein des matériaux. Une partie de l'augmentation de la conductivité thermique apparente est due à la quantité d'humidité dans le produit et une partie est due à sa migration lors de la mesure. La migration de l'humidité est due à la différence de température entre la plaque chaude et la plaque froide de l'instrument de mesure. Plus l'écart de température est important, plus la migration de l'humidité est importante. L'effet de la migration peut être réduit en réduisant la différence de température entre les deux faces du produit ou en évitant la migration avec une technique présentée dans cet article ce qui réduit les valeurs mesurées. Un écart de température de 10 °C maximal entre les plaques semble être un bon compromis entre les incertitudes qui sont de l'ordre de 1,0 % et l'influence de l'humidité qui est de l'ordre de 2%.

Références

- [1] G Philip, J. R. and De Vries, D. A., "Moisture Movement in Porous Materials Under Temperature Gradient," *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 38, No. 2, 1957, pp. 222–232.
- [2] Krisher, O. and Mahler, K., "Über die Bestimmung des Diffusionswiderstandes und der Kapillaren Flüssigkeits Leitzahl aus Stationären und Instationären Vorgängen," *V.D.I. Forschungsheft*, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1959, p. 473.
- [3] EN 12667:2001 Thermal performance of building materials and products Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Products of high and medium thermal resistance
- [4] EN 13171, Produits isolants thermiques pour le bâtiment - Produits manufacturés en fibres de bois (WF) - Spécification
- [5] EN ISO 10456 Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values
- [6] EN ISO 12570 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of moisture content by drying at elevated temperature