

Identification des propriétés thermo-physiques d'un isolant thermique lignocellulosique

Assessment of the thermo-physical properties of a lignocellulosic thermal insulator

Essolé PADAYODI^{1*}, Mohammad AGHAHADI^{1,2}, Saïd ABOUDI², S. Amir BAHRANI³

¹Pôle ERCOS, ELLIADD (EA. 4661) – Université de Bourgogne Franche Comté, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 90010 Belfort (FR)

²ICB-COMM, UMR 6303, CNRS – Université de Bourgogne Franche Comté, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 90010 Belfort (FR)

³Institut Mines-Télécom Lille-Douai, Université de Lille (FR)

*(Auteur correspondant : essole.padayodi@utbm.fr)

Résumé – La présente étude vise à caractériser les propriétés hydriques et thermiques d'un isolant lignocellulosique à différentes densités et pour différentes hygrométries de l'air ambiant. La méthode plan chaud est mise en œuvre pour la mesure de sa conductivité thermique λ_{app} et la corrélation des mesures avec les modèles théoriques de Fick et de Park permet d'estimer sa diffusivité massique D_{eff} . Pour l'isolant à 425 kg.m^{-3} et à 30°C , lorsque l'humidité relative augmente de 7,4% à 97%, D_{eff} décroît de $2,81 \times 10^{-11}$ à $0,64 \times 10^{-11} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ et λ_{app} croît de 0,03 à $0,04 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, soit +30%.

Mots clés : Conductivité thermique, isolant thermique, isotherme de désorption, plan chaud, lin

Abstract – This study aims to characterize the hydric and thermal properties of a lignocellulosic thermal insulator at different densities and for variable humidity of the ambient air. The hot plate method is implemented to measure its thermal conductivity λ_{app} and the correlation of the experiment with the theoretical models of Fick and Park allowed to estimate its mass diffusivity D_{eff} . For the insulator at 425 kg.m^{-3} and at 30°C , when the relative humidity increases from 7.4% to 97%, D_{eff} decreases from 2.81×10^{-11} to $0.64 \times 10^{-11} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ and λ_{app} increases from 0.03 to $0.04 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, i.e. +30%.

Keywords: Thermal conductivity, thermal insulator, desorption isotherm, hot plate, flax

Nomenclature

D_{eff}	Diffusivité massique effective, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	n	Nombre moyen des molécules d'eau par cluster.
T	Température, $^\circ\text{K}$		
W	Teneur en eau, %		
e	Épaisseur, m		
a_w	Activité de l'eau		
A_L	Constante de capacité de Langmuir,		
b_L	Constante d'affinité de Langmuir		
k_H	Coefficient de solubilité de la loi de Henry,		
K_a	Constante d'équilibre de la concentration en eau,		
			<i>Symboles grecs</i>
			λ Conductivité thermique, $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
			ρ Masse volumique, kg.m^{-3}
			<i>Indices et exposants</i>
			eq équilibre
			app apparent
			eff effectif
			0 initial.

1. Introduction

Les économies d'énergies constituent actuellement l'un des axes majeurs de réduction des gaz à effet de serre. La conférence des Nations Unies sur le climat (COP21) identifie le chauffage des logements et des bâtiments comme l'un des secteurs majeurs d'émission de gaz

à effet de serre. L'isolation thermique est l'une des solutions mises en œuvre pour réduire la l'énergie consommée au chauffage. Les isolants ligno-cellulosiques présentent le double intérêt d'offrir un pouvoir isolant élevé et un bilan carbone réduit. Mais leurs propriétés d'isolation thermique peuvent être altérées par l'humidité qu'ils peuvent absorber lorsqu'ils sont exposés à un environnement humide. En effet les fibres naturelles ligno-cellulosiques sont fortement hydrophiles et peuvent absorber l'humidité de l'air ambiant jusqu'à un cinquième de leur poids. La phase liquide participe alors aux transferts de chaleur en altérant la résistance thermique de l'isolant. Il peut en résulter une hausse de la consommation d'énergie au chauffage et des émissions associées.

Dans la littérature, de nombreuses études ont abordé l'affinité de l'humidité des matériaux d'origine végétale. Tellez-Perez et al. [1] et Colinart et al. [2] ont respectivement étudié le mécanisme de désorption de l'humidité lors du séchage des produits alimentaires et de son adsorption par les matériaux biosourcés. Les études de Page et al., [3] révèlent qu'après deux jours d'immersion, la fibre de lin peut absorber de l'eau jusqu'à deux fois sa masse et celle du chanvre jusqu'à quatre fois sa masse. Il en résulte une modification des propriétés des matériaux fabriqués à partir de ces fibres végétales. Pour anticiper la variation des propriétés physiques des isolants biosourcés, l'influence de l'humidité relative de l'air ambiant est étudiée. De même, les propriétés thermo-physiques de l'isolant sont fonction de sa masse volumique, c'est-à-dire de son taux de compactage lors de la mise en forme. De ce fait, la caractérisation est menée sur des échantillons de différentes masses volumiques afin de relever aussi l'influence de celles-ci.

2. Mesures expérimentales et estimation théorique

2.1. Le matériau

L'isolant thermique étudié est un Feutre de Fibres de Lin (isolant FFL). L'échantillon FFL (*Fig.1a*) est fabriqué par thermocompression à 105°C d'un mélange de fibres de lin enduites d'une fine couche d'un liant à base d'amidon de maïs modifié « *BATCH - E9879* » de la société Roquette Frères. Une fois mis en forme, l'échantillon FFL se présente sous la forme d'un enchevêtrement de fibres élémentaires de diamètre $20 \leq \phi_f \leq 30 \mu\text{m}$ et de faisceaux de fibres formant des pores interstitiels de près de 500 μm de taille (*Fig.1b*).

La caractérisation est effectuée sur des échantillons FFL₁, FFL₂, FFL₃, FFL₄ fabriqués à des masses volumiques apparentes différentes, respectives de 341 ; 425 ; 597 et 766 kg.m^{-3} .

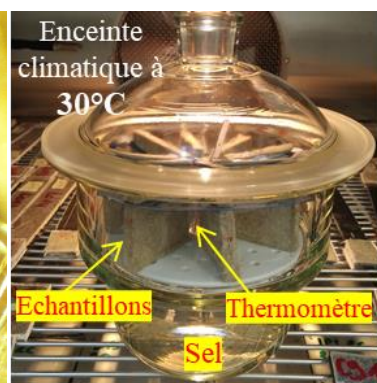
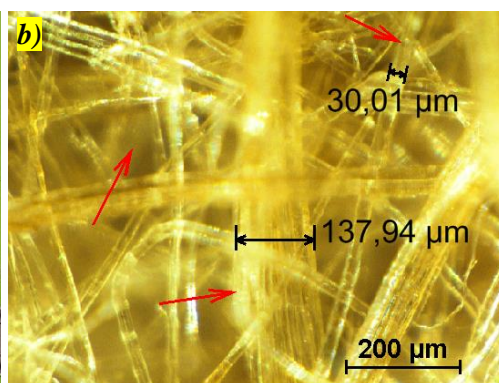


Figure 1 : Echantillon d'isolant thermique FFL ($50 \times 50 \times 4,5 \text{ mm}^3$)
(a), observation par micrographie du FFL (b)

Figure 2 : Test d'adsorption dans un dessiccateur.

2.2. Mesure expérimentale des propriétés hydriques

2.2.1. Adsorption de l'humidité : influence de la masse volumique et de l'humidité relative

Il est essentiel de déterminer :

- d'une part, l'influence de la masse volumique de l'isolant FFL sur son adsorption d'humidité et sur sa conductivité thermique afin d'optimiser sa mise en œuvre, et,
- d'autre part, l'influence de l'humidité relative de l'air ambiant sur le degré d'adsorption d'humidité de cet isolant afin de définir les conditions hygrothermiques de son utilisation. On envisagera ainsi, en cas d'hydrophilie sévère, un traitement hydrofuge pour son utilisation dans des conditions hygrométriques sévères.

A cet effet, des tests d'adsorption d'humidité sont conduits, d'une part, dans une atmosphère à humidité relative constante (7,4%) sur les échantillons de différentes masses volumiques (Fig. 4a) et, d'autre part, sur un échantillon de masse volumique constante, soit l'échantillon FFL₁ à 341 kg.m⁻³, dans des atmosphères d'humidités variables (7,4% ≤ HR ≤ 97%) (Fig. 4b).

L'adsorption d'humidité est conduite suivant la méthode gravimétrique définie par la norme *NF EN ISO 12571*. Chaque test est effectué en disposant des échantillons dans un dessiccateur contenant en son fond une solution saline saturée générant une humidité relative ambiante donnée et en disposant le dessiccateur hermétiquement fermé dans une enceinte climatique maintenue à 30°C pendant toute la durée du test (Fig. 2). La variation de la masse des échantillons est alors relevée par intermittence par pesée afin de déterminer leur teneur en eau. La teneur en eau W (en %) d'un matériau désigne le pourcentage de la masse d'eau qu'il contient par rapport à sa masse sèche.

Chaque test est conduit pendant plus de 164 heures, soit près d'une semaine, afin d'atteindre l'équilibre hygroscopique ($W = W_{eq}$) et que l'isolant n'absorbe presque plus d'humidité, soit une variation de sa masse d'au plus 1% de sa masse anhydre, entre deux mesures consécutives.

2.2.2. Mesure de l'isotherme d'adsorption

Les isothermes d'adsorption sont établis à partir des mesures par la méthode gravimétrique (*NF EN ISO 12571*) définie ci-dessus. Lorsque l'échantillon atteint l'équilibre hygroscopique avec l'atmosphère ambiante, sa teneur en eau correspond à la teneur en eau à l'équilibre W_{eq} .

Par ailleurs, les humidités relatives ambiantes générées dans le dessiccateur définissent l'activité de l'eau a_w . Cette dernière est définie comme le rapport de la pression partielle de l'air humide sur la pression de la vapeur saturante à la même température. Les humidités relatives de 7,4% à 97% correspondent à des activités de l'eau comprises entre 0,074 et 0,97. La courbe de la variation de W_{eq} en fonction de a_w est l'isotherme d'adsorption et est déterminante pour comprendre l'affinité qu'un matériau présente avec l'humidité. Les isothermes d'adsorption sont établies sur l'échantillon de plus faible masse volumique, soit l'échantillon FFL₁ à 341 kg.m⁻³, et sur celui présentant la plus forte masse volumique, soit l'échantillon FFL₄ à 766 kg.m⁻³ (Fig. 5), afin de relever l'influence de la masse volumique sur la capacité d'adsorption d'humidité de cet isolant.

2.3. Mesure expérimentale de la conductivité thermique apparente

La conductivité thermique apparente des échantillons FFL₁, FFL₂, FFL₃ et FFL₄ est mesurée expérimentalement par la méthode « plan chaud asymétrique » [4] et au moyen du dispositif expérimental associé (Fig. 3), amplement expliqués par les travaux antérieurs des auteurs [5].

La méthode « plan chaud asymétrique » est une méthode de mesure en régime permanent dans laquelle une source de chaleur plate (un élément chauffant) génère un flux de chaleur à travers l'échantillon à caractériser et un échantillon de référence disposés de part et d'autre de la source plate. Le banc de mesure comprend un dispositif sur la méthode « plan chaud ». Un générateur de tension alimente l'élément chauffant et une unité d'acquisition enregistre les températures des thermocouples instrumentés sur les faces des deux échantillons.

Cette méthode a été mise en œuvre dans la littérature pour la mesure de la conductivité thermique des isolants et des matériaux hydrophiles naturels tels que la brique [6, 7].

Afin de prendre en compte l'influence de l'humidité sur le pouvoir isolant des échantillons FFL, les mesures de la conductivité thermique sont effectuées sur l'isolant aussi bien à l'état sec qu'à l'état humide. Dans ce dernier cas, l'échantillon séjourne jusqu'à l'équilibre hygroscopique dans une enceinte climatique réglée à une hygrométrie donnée. La conductivité thermique est ensuite mesurée sur l'échantillon humide, le dispositif plan chaud étant disposé dans l'enceinte climatique.

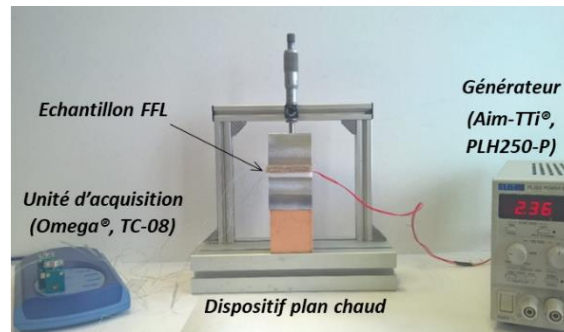


Figure 3 : Mesure expérimentale de la conductivité thermique par le dispositif plan chaud.

2.4. Corrélation des modèles théoriques aux mesures d'adsorption de l'humidité

La corrélation des courbes expérimentales d'adsorption d'humidité et des isothermes d'adsorption aux modèles théoriques permet d'identifier quelques propriétés de ces isolants, en particulier les coefficients de diffusion massique.

2.4.1. Corrélation de l'adsorption de l'humidité au modèle de diffusion de Fick

Du fait de la grande taille des pores de l'isolant thermique FFL ($\geq 500 \mu\text{m}$, Fig. 1b), son adsorption d'humidité par capillarité peut être négligée devant son adsorption par diffusion.

Le modèle de diffusion de Fick est appliqué pour décrire les phénomènes d'adsorption-désorption de l'humidité des fibres végétales, [8].

Dans ce modèle, l'évolution de la teneur en eau $w(z, t)$ suivant l'épaisseur de l'échantillon est donnée par : [9] :

$$\frac{W(z,t)-W_{eq}}{W_0-W_{eq}} = \frac{4}{\pi} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i}{(2i+1)} \cos\left(\frac{(2i+1)\pi}{e} z\right) \exp\left(\frac{-(2i+1)^2 \pi^2 D_{eff}}{e^2} t\right) \quad (1)$$

W_0 et W_{eq} désignant respectivement la teneur en eau initiale et la teneur en eau à l'équilibre, D_{eff} , la diffusivité massique effective et e , l'épaisseur de l'échantillon.

En intégrant l'expression de $w(z, t)$ sur toute l'épaisseur de l'échantillon, on obtient l'évolution de la teneur en eau moyenne $W(t)$ de l'ensemble de l'échantillon, soit [9] :

$$\frac{W(t)-W_{eq}}{W_0-W_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left(\frac{-(2i+1)^2 \pi^2 D_{eff}}{e^2} t\right) \quad (2)$$

En faisant coïncider les courbes de $W(t)$ avec les valeurs expérimentales (Fig. 4a), on peut identifier la diffusivité massique effective D_{eff} de l'isolant FFL à différentes masses volumiques. A cet effet, D_{eff} (Tab. 1) est estimée en appliquant un algorithme basé sur la méthode des moindres carrés à l'équation précédente.

2.4.2. *Corrélation de l'isotherme d'adsorption au modèle de Park*

Il existe plusieurs théories d'adsorption de l'humidité. Celle proposée par Park associe plusieurs modes de sorption, notamment la sorption de Langmuir, la sorption selon la loi de Henry et la formation d'amas de molécules d'eau ou clusters d'eau dans des sites donnés [10]. Plusieurs auteurs ont appliqué le modèle multi-sorption de Park pour la caractérisation de l'adsorption d'eau par les fibres végétales [10].

Le modèle d'adsorption de Park est exprimé par l'équation [11] :

$$W_{eq} = \frac{A_L b_L a_w}{1 + b_L a_w} + k_H a_w + K_a a_w^n \quad (3)$$

où A_L est la constante de capacité de Langmuir, b_L , la constante d'affinité de Langmuir, k_H , le coefficient de solubilité de la loi de Henry, K_a , la constante d'équilibre de la concentration en eau (cluster), n , le nombre moyen des molécules d'eau par cluster et a_w l'activité de l'eau.

Comme précédemment, en faisant coïncider la courbe théorique $W_{eq}(a_w)$ avec les valeurs expérimentales de l'isotherme d'adsorption (Fig. 5), on identifie les paramètres du modèle de Park en se servant d'un code de calcul, Matlab notamment.

3. Résultats et discussions

3.1. Adsorption de l'humidité de l'isolant en fibres de lin

La Fig. 4a donne les résultats des tests d'adsorption d'humidité des échantillons de masses volumiques variables confinés dans une atmosphère à une humidité relative constante (7,4%HR) et la Fig. 4b montre les courbes d'adsorption de l'échantillon FFL₁ à 341 kg.m⁻³ confiné dans des atmosphères de différentes humidités relatives (7,4% ≤ HR ≤ 97%).

Les courbes de la Fig. 4a montrent que dans la plage de 341 à 766 kg.m⁻³, la masse volumique influe peu sur l'absorption de l'humidité, les courbes des différents échantillons se situant dans un fuseau restreint. En revanche, selon les résultats de la Fig. 4b, l'hygrométrie du milieu ambiant influe sur l'absorption d'humidité de l'isolant thermique FFL. Sa teneur en eau d'équilibre peut varier du simple au double quand l'humidité relative croît de 7,4% à 97%, néanmoins dans la plage de 56% ≤ HR ≤ 83%, les courbes de teneur en eau présentent un faible écart entre elles. On peut dire que dans cette plage, notamment dans la plage des humidités relatives usuelles (50% ≤ HR ≤ 70%), la variation de l'hygrométrie ambiante influe peu sur l'adsorption d'humidité de l'isolant FFL₁.

La Fig. 5 montre les mesures expérimentales des isothermes d'adsorption des échantillons de plus faible et de plus haute masse volumique, soient FFL₁ et FFL₄. La quasi-absence de l'influence de la masse volumique du FFL sur son adsorption d'humidité se confirme par la parfaite superposition des isothermes de sorption des échantillons FFL₁ et FFL₄, respectivement à 341 et 766 kg.m⁻³ (Fig. 5). En clair, pour une humidité relative donnée, l'isolant FFL atteindra la même teneur en eau d'équilibre quelque soit sa densité, du moins dans la plage de 341 à 766 kg.m⁻³. La forme sigmoïdale de ces isothermes correspond au type II selon la classification BDDT [12] des isothermes d'adsorption, le type II étant caractéristique des matériaux macroporeux comme le montre l'observation micrographique (Fig. 1b).

Les données expérimentales des isothermes de la Fig. 5 sont en accord avec les valeurs des isothermes d'adsorption de matériaux biosourcés rencontrés dans la littérature [13,14].

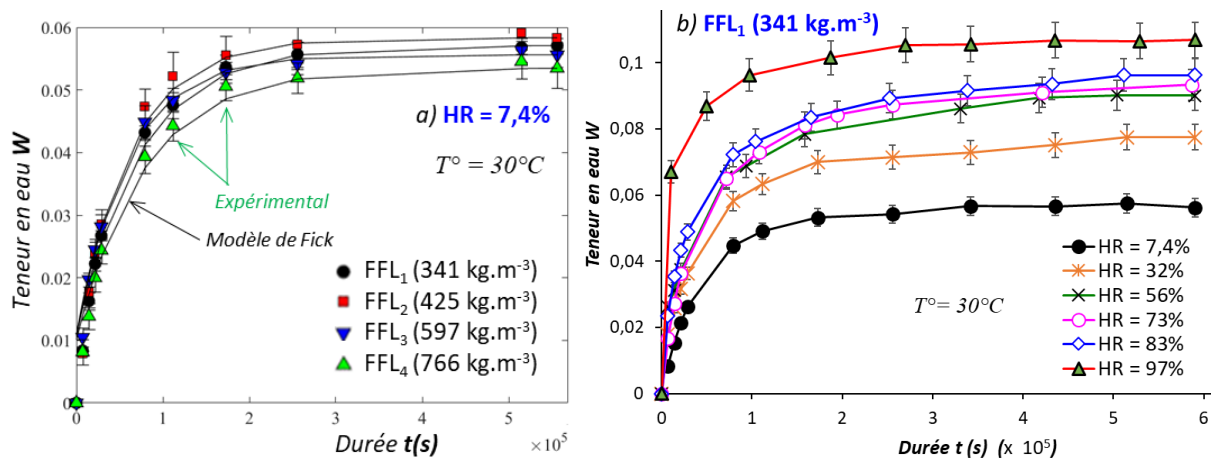


Figure 4 : Variation de la teneur en eau de l'isolant FFL de différentes masses volumiques dans une atmosphère à 7,4 % d'humidité relative et à 30°C (a) et variation de la teneur en eau de l'échantillon FFL₁ exposé à 30°C à différentes humidités relatives (b)

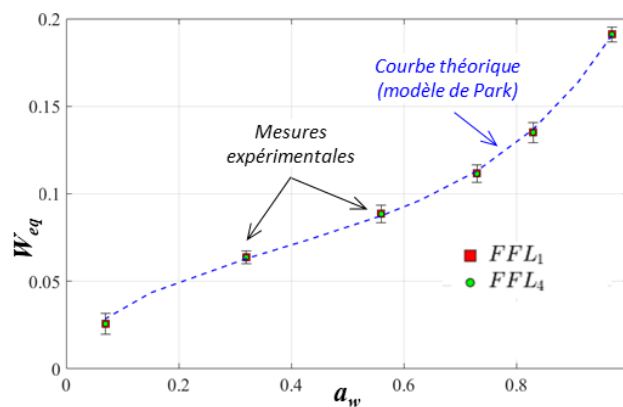


Figure 5 : Courbes expérimentales des isothermes des échantillons FFL₁ (341 k.g.m⁻³) et FFL₄ (766 kg.m⁻³) et courbe du modèle de Park

3.2. Conductivité thermique de l'isolant

La Fig. 6 donne les courbes expérimentales de l'évolution de la conductivité thermique apparente λ_{app} en fonction de la teneur en eau de l'isolant et pour différentes masses volumiques de celui-ci. L'analyse de ces résultats montre plusieurs observations :

- A l'état sec, l'isolant FFL présente une conductivité thermique de l'ordre de $0,03 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ lorsqu'il est fabriqué à une masse volumique comprise entre 341 et 425 kg.m^{-3} . Les isolants FFL₁ et FFL₂ présentent ainsi un pouvoir isolant aussi compétitif, voire meilleur, que certains isolants synthétiques et minéraux tels que le polystyrène expansé et la laine de verre. Il est également plus performant que certains isolants biosourcés, notamment la laine de mouton, les isolants en fibres de bois ou en chanvre.

- On peut remarquer que la conductivité thermique augmente sensiblement quand la masse volumique de l'isolant passe de 425 à 597 kg.m^{-3} et à 766 kg.m^{-3} , soit une augmentation de λ_{app} de +30% et de +80% respectivement, à l'état sec. En effet, l'augmentation de la masse volumique de l'échantillon s'accompagne d'une diminution de la taille des pores interstitiels et

l'air présente une conductivité thermique ($\sim 0,0262 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ à 30°C) plus faible que celle de la fibre végétale. Il s'en suit une hausse de la conductivité thermique de l'ensemble de l'isolant. Cette tendance a été rapportée par d'autres études sur les matériaux biosourcés [6, 7].

- Pour une masse volumique donnée, λ_{app} croît avec la teneur en eau de l'isolant. En effet, l'humidité contenue dans le matériau contribue au transfert de la chaleur. Bal et al., [15] rapportent que l'augmentation de la teneur en eau du matériau baisse la résistance thermique de contact avec les thermocouples, en contribuant aussi à l'accroissement de λ_{app} .

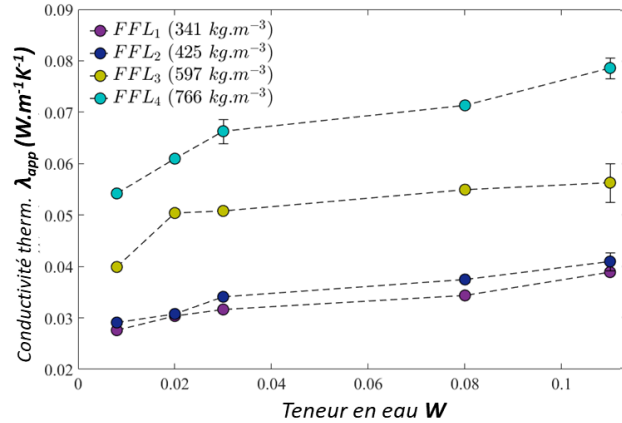


Figure 6 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur des échantillons à différentes masses volumiques

Humidité relative HR	Diffusivité massique D_{eff} $m^2\cdot s^{-1}$	Teneur en eau d'éq. W_{eq}
---	$(Incert. \pm 10^{-13})$	$(Inc. \pm 5 \times 10^{-3})$
7,4%	$2,81 \times 10^{-11}$	0,06
32%	$2,31 \times 10^{-11}$	0,08
56%	$1,94 \times 10^{-11}$	0,10
73%	$1,36 \times 10^{-11}$	0,12
83%	$1,02 \times 10^{-11}$	0,13
97%	$0,64 \times 10^{-11}$	0,18

Tableau 1 : Estimation de la diffusivité massique effective de l'échantillon FFL₂ ($425 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) et teneur en eau d'équilibre

3.3. Estimation de la diffusivité massique effective

Sur la Fig. 4a, les courbes théoriques de la teneur en eau moyenne $W(t)$ (éq. 2) déduite du modèle de diffusion de Fick sont superposées aux mesures expérimentales et sur la Fig. 5, les courbes théoriques $W_{eq}(a_w)$ du modèle d'adsorption de Park (éq. 3) sont superposées aux mesures expérimentales des isothermes.

L'allure des courbes $W(t)$ de la Fig. 4 confirme que la diffusion qui s'opère dans l'isolant FFL est bien du type de la diffusion de Fick. En effet, les courbes montrent une augmentation rapide de l'humidité absorbée suivie d'une baisse progressive de l'adsorption (baisse de la pente de la courbe), puis d'une adsorption nulle correspondant au palier de l'équilibre hygroscopique.

La mise en œuvre de ce modèle pour l'identification de la diffusivité massique D_{eff} est donc cohérente. Les valeurs estimées de D_{eff} sont reportées au tableau 1. La diffusivité massique de l'isolant étudié décroît quasi-linéairement de $2,81 \times 10^{-11}$ à $0,64 \times 10^{-11} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ lorsque l'humidité relative de l'air ambiant augmente de 7,4% à 97%. Les valeurs de D_{eff} estimées dans ce tableau sont cohérentes avec les données de la littérature sur les isolants biosourcés [13, 14].

4. Conclusion

Dans la présente étude, les isothermes d'adsorption de l'humidité d'un isolant thermique sous forme d'un feutre de fibres de lin sont établies expérimentalement. Le modèle d'adsorption de Park montre une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux. Ce modèle se révèle comme l'un des plus adaptés aux isolants biosourcés. Son mode multi-sorption serait en effet cohérent avec les mécanismes d'adsorption de l'humidité dans un matériau à fibres végétales.

L'étude permet en particulier de relever que si la masse volumique n'influe presque pas sur sa cinétique d'adsorption de l'humidité, elle fait croître sensiblement la conductivité thermique.

En effet, une augmentation de la masse volumique s'accompagne de la fermeture ou de la diminution de la taille des vides interstitiels qui jouent un rôle d'isolant. De même l'hygrométrie augmente significativement la conductivité thermique de l'isolant en altérant son pouvoir isolant. En clair, lorsque la masse volumique de cet isolant thermique croît de 341 à 766 kg.m⁻³ et qu'il passe d'un milieu sec à un milieu à 97% d'humidité relative, sa conductivité thermique croît de 0,030 W.m⁻¹.K⁻¹ à 0,08 W.m⁻¹.K⁻¹, soit une hausse de 160%.

Fabriqué à 425 kg.m⁻³, l'isolant étudié offre les mêmes performances d'isolation que celui à 341 kg.m⁻³ mais est plus consistant pour être utilisé dans le bâtiment.

Références

- [1] C. Tellez-Perez, V. Sobolik, J.G. Montejean-Gaitan et al., Impact of Swell-Drying Process on Water Activity and Drying Kinetics of Moroccan Pepper (*Capsicum annum*). *Dry Technol.*, 33 (2015), 131–142.
- [2] T. Colinart, P.Glouannec, M. Bendouma, P. Chauvelon, Temperature dependence of sorption isotherm of hygroscopic building materials. Part 2: Influence on hygrothermal behavior of hemp concrete, *Energy Build* 152 (2017), 42–51.
- [3] J. Page, M. Sonebi, S. Amziane, Design and multi-physical properties of a new hybrid hemp-flax composite material, *Constr Build Mater.*, 139 (2017), 502–512.
- [4] N. Laaroussi, G. Lauriat, M. Garoum, et al., Measurement of thermal properties of brick materials based on clay mixtures, *Constr Build Mater.*, 70 (2014), 351–361.
- [5] M. Aghahadi, E. Padayodi, S. Abboudi, S.A. Bahrani, Physical modeling of heat and moisture transfer in wet bio-sourced insulating materials, *Rev Sci Instrum.*, 89 (2018).
- [6] O. Vololonirina, M. Coutand, B. Perrin, Characterization of hygrothermal properties of wood-based products – Impact of moisture content and temperature, *Constr Build Mater.*, 63 (2014), 223–233.
- [7] B. Haba, B. Agoudjil, A. Boudenne, K. Benzarti, Hygric properties and thermal conductivity of a new insulation material for building based on date palm concrete. *Constr Build Mater.*, 154 (2017), 963–971.
- [8] G. Abdulla, A. Belghit, K. Allaf, K. Impact of instant controlled pressure drop treatment on moisture adsorption isotherm of cork granules. *Dry. Technol.*, 27 (2009), 237–247.
- [9] K.-E. Atcholi, E. Padayodi, J. Vantomme, K. Kadja, D. Perreux, Experimental study of the drying and modelling of the humidity migration in a clay matrix, *Int. J. Simul. Multidisci. Des. Optim.*, 2 (2008), 91–97
- [10] M. Broudin, V. Led Saux, Le Gac Py, et al., Moisture sorption in polyamide 6.6: Experimental investigation and comparison to four physical-based models. *Polym Test.*, 43 (2015), 10–20.
- [11] A. Bessadok, S. Marais, F. Gouanve, et al., Effect of chemical treatments of Alfa (*Stipa tenacissima*) fibres on water-sorption properties. *Compos Sci Technol.*, 67 (2007), 685–697.
- [12] S. Brunauer, L.S. Deming, W.E. Deming, E. Tellier, On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases, *J Am Chem Soc.*, 62 (1940), 1723–1732.
- [13] F. Gouanve, S. Marais, A. Bessadok, et al., Study of water sorption in modified flax fibers. *J. Appl Polym. Sci.*, 101 (2006), 4281–4289.
- [14] S. Alix, E. Philippe, A. Bessadok, et al., Effect of chemical treatments on water sorption and mechanical properties of flax fibres, *Bioresour. Technol.*, 100 (2009), 4742–4749.
- [15] H. Bal, Y. Jannot, S. Gaye, F. Demeurie, Measurement and modelisation of the thermal conductivity of a wet composite porous medium : Laterite based bricks with millet waste additive. *Constr Build Mater.*, 41 (2013), 586–593.