

ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS THERMO PHYSIQUES DES ISOLANTS FIBREUX TEXTILE

Amine TILIOUA*, Laurent LIBESSART*, Annabelle JOULIN, Stéphane LASSUE****

*Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), HEI, F-59046 LILLE, France,

**Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), Univ d'arts - Lille Nord de France,
F-62400 BÉTHUNE, France
amine.tilioua@hei.fr

1. INTRODUCTION

Le transfert de chaleur dans les matériaux fibreux se fait par conduction et rayonnement. Les matériaux isolants ont une spécificité des matériaux semi-transparents. Le transfert radiatif couplé avec la conduction à travers ces matériaux est l'objet de nombreuses études expliquées par la demande croissante de l'industrie et les applications dans la thermique du bâtiment. La conduction est le mode de transfert de chaleur le plus dominant ce qui justifie en quelque sorte la négligence de la convection dans la modélisation. Une des caractéristique qui distingue ces isolants est la porosité qui peut atteindre un pourcentage assez élevé à température ambiante dans certains matériaux fibreux. Ce genre d'isolants est constitué de fibres cylindriques réparties de manière plus ou moins aléatoire dans l'espace. Pour optimiser l'efficacité énergétique de l'isolant, il est donc nécessaire de maîtriser et de contrôler les transferts de chaleur par rayonnement et par conduction. Plusieurs auteurs ont abordé le problème du transfert thermique au sein de matériaux fibreux. Nous citons par exemple Kaemmerlen et al [3] qui ont considéré le transfert thermique au sein du matériau fibreux : la laine de

bois. Ce matériau utilisé pour l'isolation des bâtiments est considéré comme un matériau semi-transparent non-gris, absorbant et diffusant. Ils ont identifié les propriétés radiatives (albédo, épaisseur optique et la fonction phase) par une méthode inverse en se basant sur des mesures expérimentales de transmission et réflexion. Ils ont constaté que la partie du transfert radiatif est presque négligée par rapport la partie transfert phonique (transfert par conduction air et fibres).

Dans ce travail, nous nous intéressons au transfert thermique par conduction et rayonnement. Le plan de cette étude est le suivant. Dans la section suivante, nous nous intéressons à l'influence de la morphologie des matériaux sur le transfert thermique. On y présentera les lois régissant la conduction et rayonnement en analysant les équations du transfert thermique ainsi que la conductivité apparente du matériau en fonction de la morphologie. Dans la section 3, nous décrivons les matériaux étudiés en donnant leur caractéristiques thermiques. La section 4 présente la méthodologie expérimentale et quelques résultats de comparaison. La modélisation numérique est effectuée dans la section 5 où on compare avec les résultats expérimentaux de la section 4. On conclut ce travail dans la dernière sec-

tion par des remarques et des perspectives pour des développements ultérieurs.

2. INFLUENCE DE LA MORPHOLOGIE DES MATÉRIAUX SUR LE TRANSFERT THERMIQUE

On commence par la description des équations retenues pour la modélisation numérique du transfert thermique. On passera ensuite à l'étude de l'influence de la morphologie des matériaux.

Le champ thermique au sein du matériau fibreux est décrit par l'équation de conservation de l'énergie

$$\nabla \cdot (\lambda_c \nabla T) = (\rho C_p) \frac{\partial T}{\partial t} \quad [1]$$

avec λ_c représente la conductivité équivalente, celle-ci dépendra des conductivités thermiques de deux phases gaz et solide λ_s et λ_g , mais aussi de la morphologie du matériau fibreux surtout la porosité :

$$\lambda_c = \lambda_s + \lambda_g \quad [2]$$

Fassel et al [1] ont considéré comme matériau fibreux la laine de bois. Ils ont négligé le transfert radiatif afin d'évaluer l'influence de la microstructure sur le transfert thermique en utilisant le logiciel commercial ABAQUS. Ils ont constaté que la microstructure a une certaine influence sur la conductivité thermique de la phase solide ainsi que la densité.

La résolution de l'équation de conservation de l'énergie permet de déterminer le champ de températures à chaque instant. Le flux conductif est déterminé grâce à la loi de Fourier.

En transfert thermique unidirectionnel, des schémas de différences finies sont utilisés pour résoudre l'équation. Cette résolution nécessite la connaissance d'un certain nombre de paramètres.

L'équation de conservation d'énergie s'écrit à la position x et l'instant t :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}(x, t) - \frac{\partial}{\partial x} \left(k(T(x, t)) \frac{\partial T}{\partial x}(x, t) \right) = S_r(x, t) \quad [3]$$

Banner et al [6] ont développé une relation semi-empirique pour la conductivité thermique

$$k(T) = 0.2572T^{0.81} + 0.0527\rho^{0.91}(1 + 0.0013T) \quad [4]$$

Notons que cette relation prend en compte la conduction d'air, des fibres de verres et de contact entre les fibres.

L'équation de conservation d'énergie est couplée au transfert radiatif via le terme de source radiative (F. Asllanaj et al) [7]

$$S_r(x, t) = -\frac{\partial Q}{\partial x}(x, t) \quad [5]$$

Le flux de chaleur total est la somme des flux radiatif et conductif

$$Q_t = Q_r + Q_c \quad [6]$$

En régime stationnaire l'équation de conservation d'énergie devient :

$$\frac{\partial Q_t}{\partial x}(x) = 0 \quad [7]$$

Nous regardons maintenant l'effet de la morphologie sur le transfert thermique.

L'étude de la morphologie du matériaux fibreux se fait à l'échelle locale ou à l'échelle micro-mésoscopie. Les mesures par microscope électronique à balayage permettent de déterminer un certain nombre de paramètres mais les images en 2D ne donnent que des propriétés de surface et non de profondeur.

A partir des images types (Figure 1), nous avons simulé la conductivité thermique en fonction de la porosité grâce au logiciel ABAQUS en la comparant avec d'autres modèles analytiques. Ceci en fonction de la porosité et la conductivité thermique de deux phases solide et gaz (Tilioua et al [4]). Dans [4] nous avons constaté que la porosité des matériaux fibreux représente un facteur important pour leur performance énergétique (Figure 2).

3. DESCRIPTION DES MATÉRIAUX ISOLANTS ÉTUDIÉS

Nous avons choisi trois matériaux fibreux de différents caractéristiques ainsi que de différentes morphologies structures fibreuses. Les matériaux étudiés sont le ouate polyester, le chanvre et la laine de verre. La laine de verre est l'un des matériaux les plus utilisés dans l'isolation des bâtiments, ce matériau est obtenu par fusion à partir de roche, de verre ou de laitier, sa conductivité thermique qui est de l'ordre de 0,039 W/m.K et l'avantage de ce matériau est imputrescible et non hydrophile dans les usages en bâtiments. Ensuite notre deuxième matériau est le chanvre. Le choix de ce matériau est par sa composition fibreuse complexe qui est issu de fibres naturelles. Ses fibres sont conditionnées sous forme de nappes, auxquelles est ajouté un liant à base de fibres de polyester (entre de 10% à 25%) afin de constituer un matelas fibreux souple et assurer la cohésion de ce matelas. Le dernier isolant que nous allons étudié c'est la ouate polyester composé de 85% de fibres issues de recyclage de bouteilles en plastiques et de 15% de fibres thermolies. Le tableau suivant présente les différents caractéristiques de ces matériaux. Intini et Kuhttz ont défini un éco-profil l'isolant de fiber polyester recyclé à partir de PET. Les avantages énergétiques et environnementaux associés à son utilisation dans les bâtiments résidentiels ont été évalués selon une approche cycle de vie. Leur résultats montrent que l'utilisation de déchets de PET implique une réduction significative des impacts environnementaux liés à l'utilisation de PET vierge tout en maintenant les propriétés thermo-physiques (Figure 3).

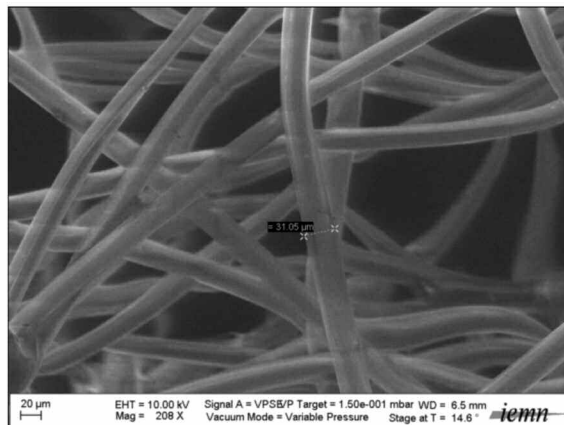
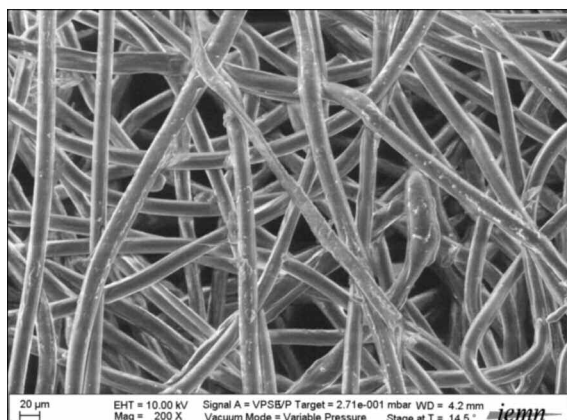


Figure 1 : Photos microscopiques de l'isolant Ouate polyester.

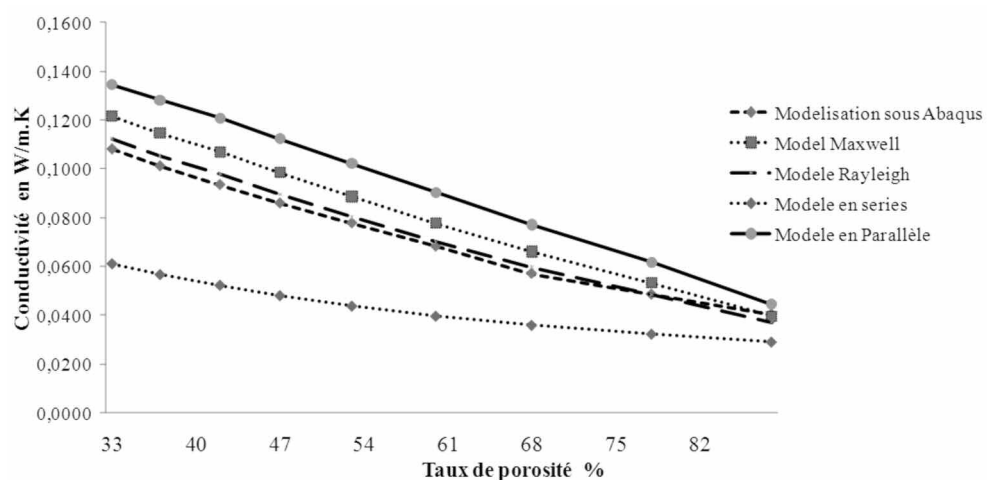


Figure 2 : Variation de la conductivité en fonction de la porosité du matériau

4. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Kaemmerlen et al [3] ont utilisé la méthode de plaque chaude. Dans le cadre de notre étude, la conductivité thermique équivalente est déduite par mesure fluxmétrique. Cette méthode consiste à mesurer le flux thermique traversant un échantillon dont la température de l'une des faces est contrôlée (face chaude) et dont la face opposée est froide.

On impose un écart de température permanent entre les deux faces de l'échantillon. L'échantillon est placé entre deux plaques échangeuses en aluminium. Des bains thermo statés, sources froides et chaudes permettent une régulation de la température. Entre les plaques échangeuses et l'échantillon les fluxmètres sont placés sur chacune des deux faces. Les fluxmètres utilisés sont du type « à gradient tangentiels ». Leur épaisseur est de 0.2 mm et leur sensibilité est 0,2 mm et leur sensibilité est 121 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ pour un capteur de sur-

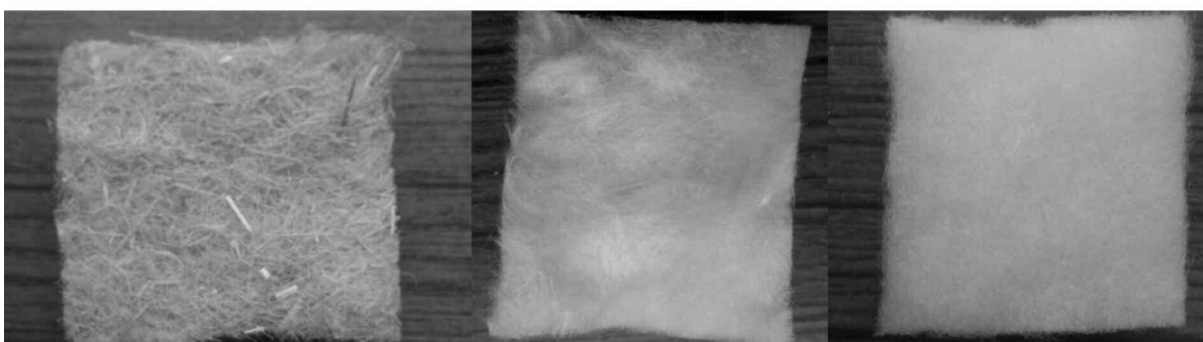


Figure 3 : Photos des matériaux isolants étudiés (a. le chanvre b. la laine de verre c. la ouate polyester)

Matériaux	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (Kg/m ³)	Capacité thermique (J/kg.K)	Epaisseur (cm)
Ouate polyester	0,035	20,80	2100	0,10
La chanvre	0,04	27,22	1600	0,09
La laine de verre	0,038	41,29	1030	0,09

Tableau 1 : Caractéristiques thermiques des matériaux isolants étudiés

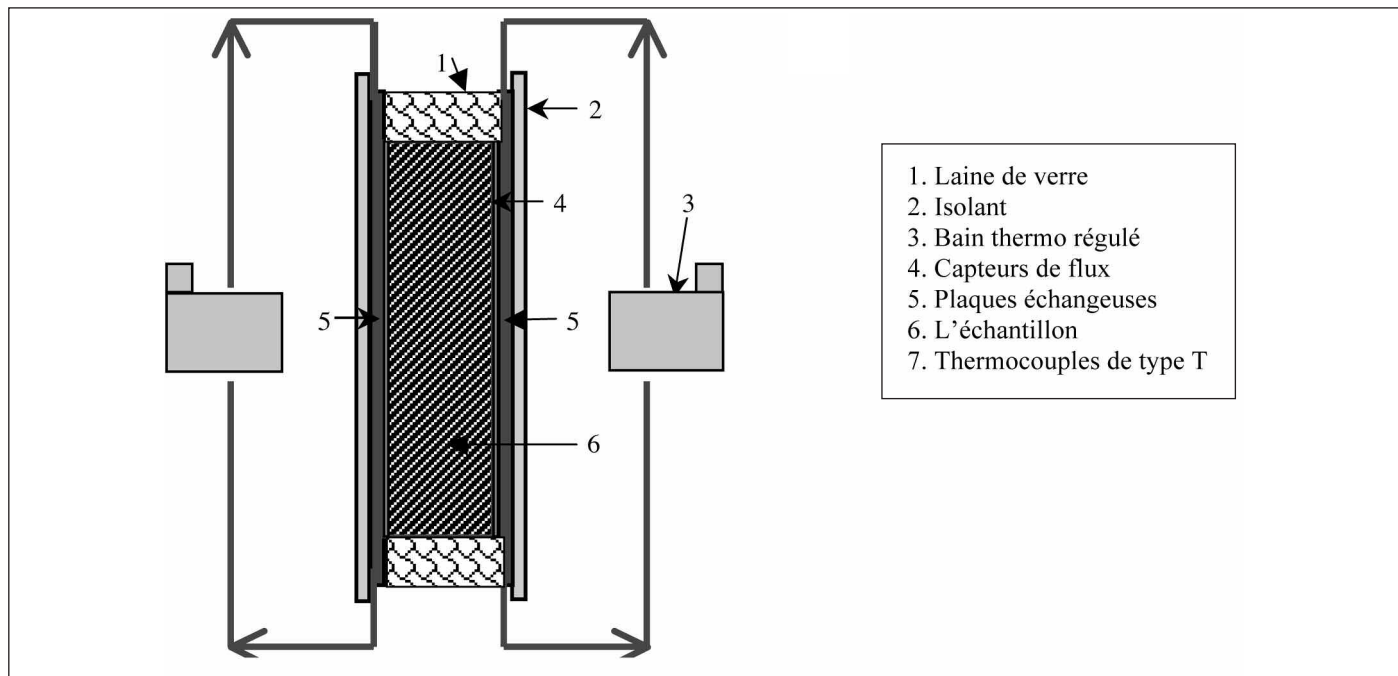


Figure 4 : Schéma du dispositif expérimental développé au LGCgE

face 15×15 cm². Ces fluxmètres sont étalonnés à l'aide de résistances électriques (Figure 4).

Le temps d'attente nécessaire pour que le transfert de chaleur au sein de l'isolant atteigne le régime établi dépend des conditions de mesures et des caractéristiques du milieu isolant. Le transfert thermique est parfaitement établi (plus de variations temporelles de température ni de flux au sein de l'isolant). La conductivité équivalente est déduite des mesures du flux de chaleur au niveau des deux plaques. En effet, on a la relation suivante :

$$Q = -k \frac{\Delta T}{\Delta z} \quad [8]$$

$$k = \frac{|Q| \cdot \Delta z}{\Delta T} = \frac{Q \cdot E}{\Delta T} \quad [9]$$

Afin de valider la résolution du transfert de chaleur dans une superposition de milieu homogène, la laine de chanvre et la laine de verre faisaient en moyenne 90 mm d'épaisseur tandis que la Ouate polyester faisait 100 mm d'épaisseur. Les mesures ont été effectuées jusqu'à atteindre le régime permanent.

La conductivité thermique réelle λ des matériaux de type fibreux intervenant dans l'équation de conservation d'éner-

gie est souvent inaccessible du fait de la présence de phénomène radiatif intervenant intrinsèquement lors de mesures expérimentales.

Les mesures fluxmétriques (Figure 5) montrent que le flux supérieur et inférieur au sein du matériau de chanvre prennent beaucoup de temps pour superposer par d'autres flux des matériaux comme la ouate polyester et la laine de verre. Cette différence peut être liée à l'hypothèse des frontières transparentes.

Nos mesures fluxmétriques ont été effectuées sur les différents matériaux : le chanvre, la laine de verre et la ouate polyester. La figure 6 montre la variation de la conductivité thermique en fonction de la température. Nous remarquons que cette variation est linéaire pour les matériaux.

Kaemmerlen et al ont traité le transfert de chaleur en régime transitoire unidirectionnelle couplée (transfert radiative et conductive) pour le matériau la laine de bois, les résultats du modèle numérique en régime transitoire ont été validés en les comparant avec des mesures fluxmétriques. Ils ont constaté que la température et la capacité du chaleur avaient une fort influence sur les résultats numériques en régime transitoire.

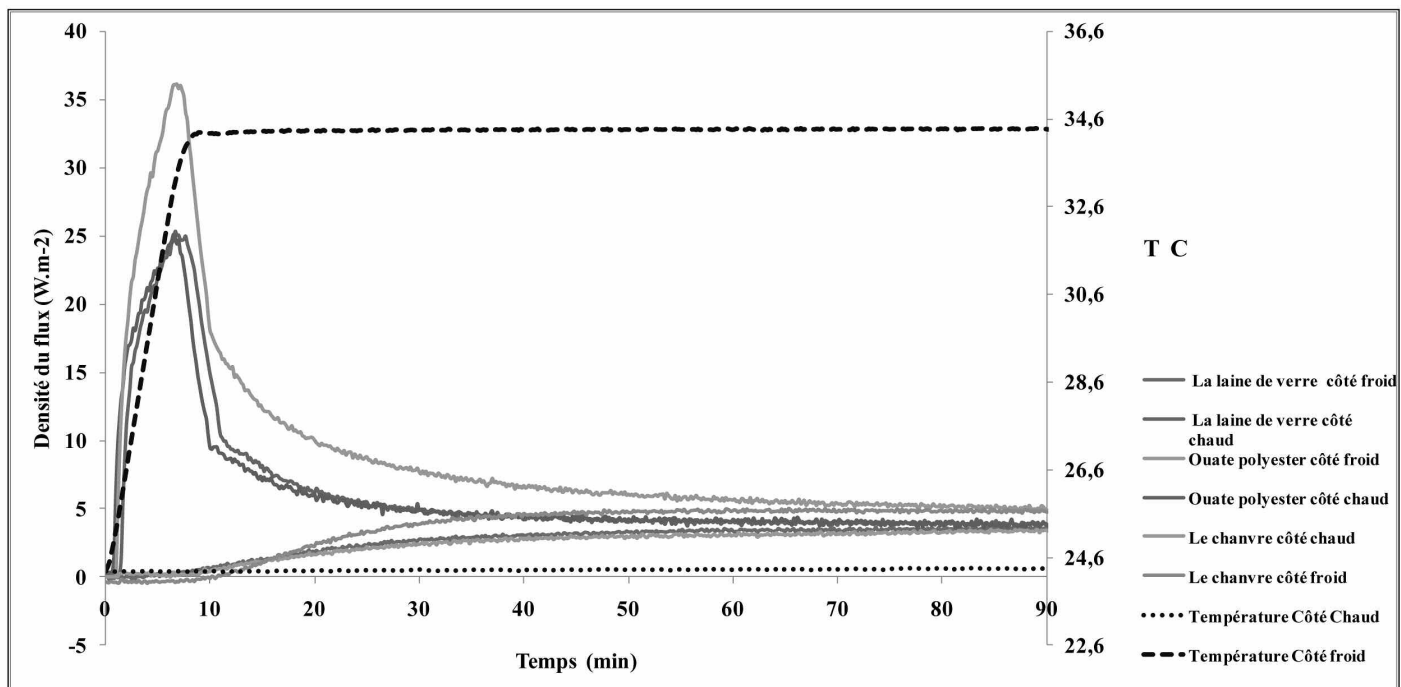


Figure 5 : Mesures fluxmétriques des trois matériaux

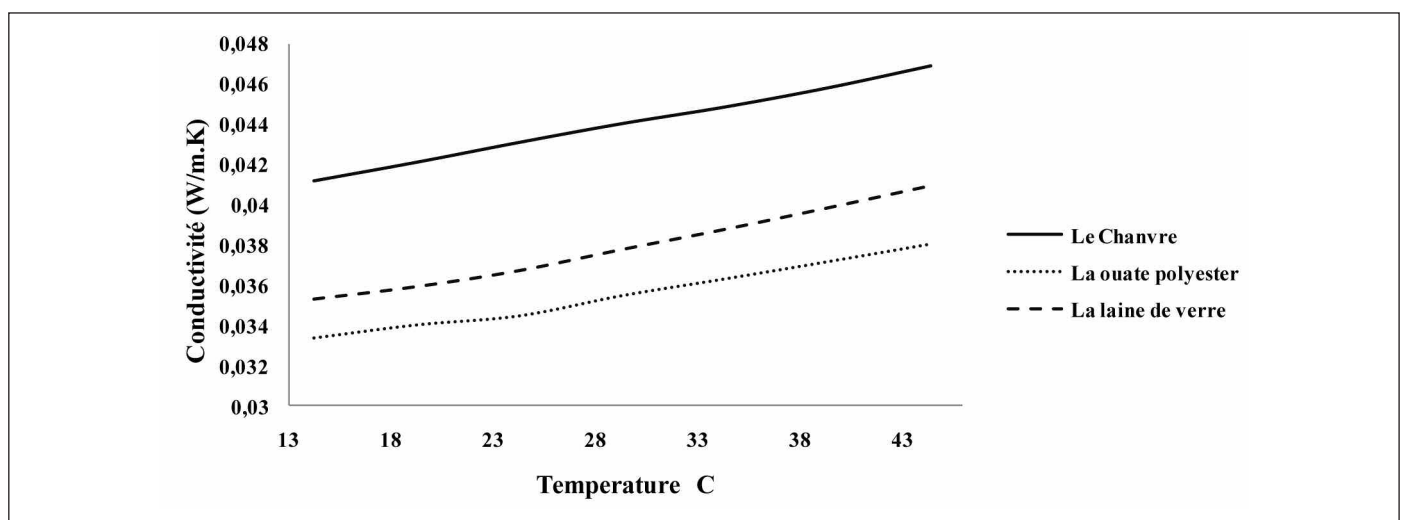


Figure 6 : Variation de la conductivité en fonction de la température

5. COMPARAISON DES RÉSULTATS NUMÉRIQUES AVEC LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES

Nous avons effectué une étude de sensibilité des différents paramètres sur les résultats. Nous avons ensuite comparé nos résultats avec les données issues du dispositif fluxmétriques, lorsque les paramètres sont fixés. La discrétisation spatiale est constitué de 100 points. Elles ont chacune un pas spatial constant.

La figure 7 nous montre que le flux côté plaque chaude en régime transitoire est plus important lorsqu'on augmente la chaleur massique, tandis que le flux côté froid diminue. Cette variation est due de la propagation rapide de la chaleur dans le milieu, ce qui explique que l'inertie du matériau est plus faible. Nous observons un écart entre le numérique et l'expérimental. Cet écart pourrait être dû à une erreur expérimentale, ou à un paramètre expérimental

non maîtrisé. L'origine pourrait ainsi être l'état de surface des isolants fibreux, car la surface n'est pas lisse ce qui nous permet de prendre en compte l'hypothèse des frontières transparentes.

6. CONCLUSION

Ce travail reporte des résultats expérimentaux et numériques des propriétés thermo physiques pour les isolants fibreux. Les conductivités thermiques effectives des matériaux isolants textiles ont été mesurées en température de 295-320K. La capacité thermique a été aussi mesurée par différentes températures, nous avons constaté que la morphologie de la microstructure du matériau textile influence fortement sur la conductivité thermique. La modélisation numérique en régime transitoire nous a montré que la capacité thermique joue un rôle important sur l'efficacité énergétique du matériau. Dans cet article nous n'avons pas pris

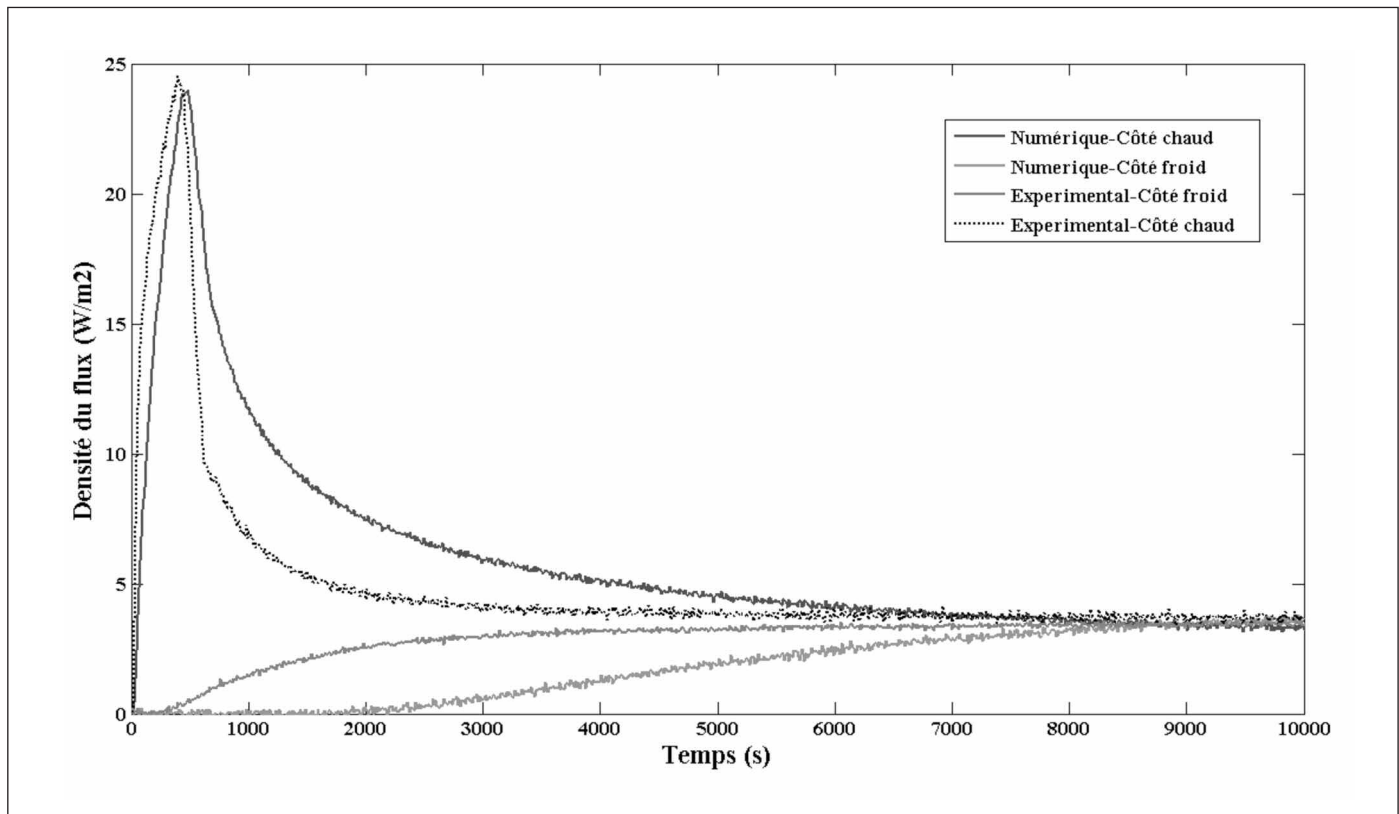


Figure 7 : Comparaison des flux numériques et expérimentaux aux frontières en régime transitoire du matériau ouate polyester

en compte le transfert radiatif, ce que nous envisageons de traiter comme problème de couplage conductif et radiatif dans les futurs travaux.

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. Faessel, C. Delisée, F. Bos, P. Castéra. « 3D Modelling of random cellulosic fibrous networks based on X-ray tomography and image analysis ». *Composites Science and Technology*, Volume 65, Issue 13, October 2005, Pages 1931-1940
- [2] I. Francesca, K. Silvana. « Recycling in buildings : an LCA case study of a thermal insulation panel made of polyester fiber, recycled from post-consumer PET bottles ». *The international journal of life cycle assessment*. 16 (2011) 306-315
- [3] A. Kaemmerlen, F. Asllanaj, H. Sallée, D. Baillis, G. Jeandel. « Transient modeling of combined conduction and radiation in wood fibre insulation with experimental data ». *International Journal of Thermal Sciences*. 49 (2010) 2169-2176
- [4] A. Tilioua, L. Libessart, A. Joulin, S. Lassue. « Etude de textiles innovants pour une réhabilitation performante des enveloppes de bâtiments : Modélisation du transfert thermique dans les matériaux textiles ». *CIFQ 2011*, Canada
- [5] Z. Cheheb, F. Albouchi, S. Ben Nasrallah. « Measurement of thermal radiative and conductive properties of semi-transparent materials using a photothermal crenel method ». *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 109 (2008) 620-635
- [6] D. Banner, S. Klarsfeld, C. Langlais. « Temperature dependence of the optical characteristics of semitransparent porous media ». *High temp.-High Pres* 21 (1989) 347-354
- [7] F. Asllanaj, G. Jeandel, J.R. Roche, D. Lacroix. « Transient combined radiation and conduction heat transfert in fibrous media with temperature and flux boundary conditions ». *International Journal of Thermal Sciences* 43 (2004) 939-950.