

# Transferts thermiques dans les *blankets* aérogels de silice

Kévin NOCENTINI<sup>1\*</sup>, Pascal BIWOLE<sup>1,2</sup>, Patrick ACHARD<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MINES ParisTech, PSL Research University PERSEE – Centre procédés énergies renouvelables et systèmes énergétiques, 06904 Sophia Antipolis, France

<sup>2</sup> Université Côte d'Azur, Laboratoire J.A. Dieudonné UMR CNRS 7351, Nice, France

\* kevin.nocentini@mines-paristech.fr

**Résumé** - Les aérogels de silice sont des matériaux ultra poreux constitués de nanoparticules de silice amorphes, interconnectées en un réseau 3D fractal aléatoire. Leur texture mésoporeuse en fait d'excellents isolants thermiques qui suscitent beaucoup d'intérêt pour réduire les déperditions à travers les enveloppes. Pour pallier à leur fragilité mécanique, un réseau fibreux est ajouté permettant d'obtenir un matériau composite – appelé *blanket* aérogel - renforcé, flexible, tout en conservant une faible conductivité thermique effective. Le transfert de chaleur dans ces matériaux est complexe et résulte de quatre contributions : transfert radiatif, conduction solide au sein des fibres et de la matrice, conduction gazeuse et couplages entre les modes de transfert précédents. Des modèles de conductivité thermique du composite sont présentés et discutés dans notre étude, et peuvent être utilisés pour aider à optimiser les paramètres de conception du matériau en cherchant à minimiser sa conductivité thermique effective.

## Nomenclature

### Symboles :

$A$	Surface de l'élément, m <sup>2</sup>
$d$	Épaisseur, mm
$c$	Vitesse du son, m.s <sup>-1</sup>
$D$	Dimension caractéristique, nm
$e$	Extinction spécifique effective, m <sup>2</sup> .kg <sup>-1</sup>
$E_b$	Emittance totale du corp noir, W.m <sup>-2</sup>
$E_{b,\lambda}$	Emittance monochromatique du corp noir, W.m <sup>-3</sup>
$Kn$	Nombre de Knudsen
$K_R$	Coefficient de Rosseland
$l$	Libre parcours moyen, nm
$m$	Fraction massique
$M$	Masse, mg
$n$	Indice de refraction
$r$	Coefficient de proportionnalité
$P$	Porosité
$P_g$	Pression du gaz, Pa
$T$	Température, K
$Tr$	Température radiante moyenne, K
$T_A$	Transmittance
$v$	Fraction volumique

### Lettres grecques :

$\beta$	Coefficient dépendant du type de gaz et de la température
$\lambda$	Conductivité thermique, W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$\Lambda$	Longueur d'onde, nm
$\rho$	Densité, kg.m <sup>-3</sup>
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann, W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup>
$\tau$	Épaisseur optique

### Indices / Exposants :

$0$	squelette solide
$a$	aérogel
$b$	blanket
$c$	conduction
$cg$	conduction gaz
$cs$	conduction solide
$coupl$	couplage
$eff$	effective
$f$	fibres
$g,0$	gaz, sans convection
$macro$	macroporeux
$meso$	mesoporeux
$pht$	photons
$r$	rayonnement

## 1. Introduction

Les aérogels de silice sont des matériaux légers, transparents, mésoporeux préparés par synthèse sol-gel et séchés par CO<sub>2</sub> supercritique [1]. Ils sont constitués de nanoparticules (2-10 nm) interconnectées en un réseau 3D. Il en résulte alors une très forte porosité (85%-99%), une faible densité (30-150 kg.m<sup>-3</sup>), une grande surface spécifique (500-1300 m<sup>2</sup>.kg<sup>-1</sup>), une faible propagation du son en leur sein (50-300 m.s<sup>-1</sup>) et une conductivité thermique (0.01 – 0.02 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) plus faible que celle de l'air immobile (ces matériaux sont appelés super-isolants) [2]. Ces avantages en font un matériau très prometteur pour l'isolation thermique et phonique, en particulier dans le domaine du bâtiment qui est responsable de plus de 40 % de l'énergie primaire totale consommée en Europe.

Cependant, trois problèmes limitent l'application de l'aérogel de silice en tant que super-isolant thermique. Premièrement, le squelette de silice est fragile à cause de la faible surface de contact entre chaque nanoparticule. Le second problème est l'augmentation drastique du transfert radiatif à haute température du fait des faibles coefficients d'extinction de l'aérogel de silice pour des longueurs d'onde comprises entre 2 et 8 μm [1]. Enfin, l'étape de séchage super-critique est considérée comme un désavantage majeur pour l'industrialisation à grande échelle car c'est un long processus discontinu qui nécessite de fortes pressions et qui ne permet de sécher que des lots de matériaux.

L'incorporation de fibres sous forme de laine/mat dans la matrice aérogel permet de renforcer mécaniquement le matériau et de réduire le transfert radiatif en augmentant les coefficients d'absorption et de diffusion du matériau. De plus, l'ajout de fibres – ainsi que d'un agent hydrophobant – permet de réaliser un séchage subcritique – ou ambiant – plus favorable à l'industrialisation du procédé.

Les travaux présentés ici proposent un modèle simple pour décrire le transfert de chaleur dans le *blanket* aérogel. Ce modèle est basé sur la littérature concernant les transferts thermiques dans les aérogels purs, adapté à notre matériau, sur des mesures de transmission infrarouge à transformée de Fourier et sur des analogies électriques pour la prise en compte des fibres.

## 2. Description du matériau

Les matériaux étudiés sont des *blankets* aérogels conçus par la société ENERSENS dans le cadre du projet européen HOMESKIN [3]. Initialement, un réseau fibreux (de verre ou de PET) est imprégné par une solution de précurseur TEOS pré-hydrolysé. De la gélification *in situ* de cette solution, on obtient un organogel, qui par la suite est rendu hydrophobe par silylation en utilisant de l'hexaméthylidisiloxane (HMDSO) en milieu acide. Cette étape d'hydrophobisation est très importante car elle empêche toute modification de la structure en cas de condensation capillaire qui causerait une dégradation des propriétés thermiques et mécaniques du matériau. Enfin, le gel composite que l'on obtient est séché à pression ambiante pendant une heure. La fraction volumique de fibres du composite est généralement comprise entre 1 % et 8 % dans le but de minimiser l'augmentation de la conduction thermique au travers des fibres elles-mêmes, tout en renforçant mécaniquement l'isolant.

L'amélioration de l'aérogel de silice par l'ajout de fibres et d'un agent hydrophobant permet d'obtenir un super-isolant avec de bonnes propriétés mécaniques sans recours au séchage super-critique. En comparaison avec de l'aérogel de silice classique, les *blankets* aérogels sont beaucoup plus opaques et plus flexibles mais ils relâchent beaucoup de poudre lors de leur manipulation et de leur découpe. Les *blankets* obtenus dans le cadre du projet HOMESKIN

ont une conductivité thermique de  $0,015 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , une densité de  $110 \text{ kg.m}^{-3}$  et une fraction volumique de fibres de 1% - 3%.

### 3. Modèles de conductivité thermique

#### 3.1. Aérogels de silice natifs

Pour l'aérogel de silice natif, les trois modes de transfert thermique sont la conduction solide à travers le squelette de silice, la conduction gazeuse à travers le réseau de pore ouvert et le rayonnement par émissions entre parois. Pour un aérogel optiquement épais, ce qui est le cas pour des aérogels opacifiés ou des *blankets* aérogels, le transfert de chaleur est gouverné par un mécanisme de diffusion de photons (rayonnement) et de diffusion de phonons (conduction solide). Quant à la conduction gazeuse, elle dépend de la taille des pores, du type de gaz et de sa pression. La convection est ici négligeable à cause de la petite taille des pores.

Il est bien connu de la littérature [4] qu'un modèle de base pour la conductivité thermique d'un aérogel de silice est :

$$\lambda = \lambda_c + \lambda_r = \lambda_{cs} + \lambda_{cg} + \lambda_r \quad (1)$$

Cependant, le modèle précédent s'avère être incomplet car les modes de transfert de chaleur sont couplés. Il faut ajouter un terme de couplage à l'équation précédente :

$$\lambda_{coupl} = \lambda_{cs,cg} + \lambda_{cs,r} + \lambda_{cg,r} \quad (2)$$

Le couplage entre rayonnement et conduction (solide et gazeuse) a largement été étudié pour des matériaux poreux conventionnels et a été rapporté par Heinemann et al. [5]. Le rayonnement absorbé par le solide et par les molécules de gaz augmente localement la température et modifie la conduction gazeuse et solide. Cependant, ce couplage n'a réellement un impact que pour des aérogels légers et transparents, lorsque le transfert radiatif est prépondérant, et en particulier pour les hautes températures. Nous pouvons négliger cet effet pour des aérogels optiquement épais.

Le couplage entre conduction gazeuse et conduction solide a été rapporté par Reichenauer et al. [6]. Ce couplage dépend de la structure du matériau et de la pression du gaz. Aux abords des particules primaires de silice voisines, la diffusion gazeuse des molécules génère des ponts thermiques. Ainsi, le transfert thermique augmente localement le long du squelette solide. Swimm et al. [7] proposent de tenir compte de ce couplage en multipliant la conduction gazeuse par un facteur d'accommodation de 2 à 3.5 déterminé par l'expérience. Ce facteur dépend de la densité de l'aérogel de silice, de la taille des particules et de celles des pores.

##### 3.1.1. Conduction solide

La conduction solide au sein de l'aérogel dépend de la structure du squelette, de l'interconnectivité des particules primaires, et de la structure chimique. Fricke [8] a été le premier à proposer un modèle de conduction solide. Il décrit le transfert de chaleur par la diffusion des phonons à travers les chaînes de particule solide du squelette.

$$\lambda_{cs} = \lambda_0 \frac{\rho \cdot c}{\rho_0 \cdot c_0} \quad (3)$$

Ce modèle fait l'hypothèse que la chaleur spécifique du squelette et celle de la silice sont égales, ce qui est assez réducteur car la silice nanostructurée a une dimension caractéristique très proche de celle du libre parcours des phonons. Le modèle théorique de Fricke tend à sous-évaluer la conduction solide de l'aérogel, et de nouveaux modèles plus précis ont vu le jour

par la suite. Scheuerpflug et al. [9] et Kamiuto[10] ont observé une proportionnalité entre la conductivité solide et la conductivité du squelette.

$$\lambda_{cs} = r \cdot \lambda_0(T) \quad (4)$$

Kamiuto détermina  $r$  expérimentalement en fonction de la densité pour des aérogels de densité comprise entre 70 et 260 kg.m<sup>-3</sup> :

$$r = \frac{\rho}{\rho_0} e^{-\left(9,298-6,91 \cdot \left(1-\frac{\rho}{\rho_0}\right)\right)\left(1-\frac{\rho}{\rho_0}\right)} \quad (5)$$

### 3.1.2. Conduction gazeuse

Les paramètres utilisés pour décrire la conduction gazeuse sont la pression du gaz et l'incidence du confinement sur le libre parcours des molécules de gaz. Ce dernier est décrit par le nombre de Knudsen :

$$Kn = \frac{l}{D} \quad (6)$$

Kaganer [11] a introduit la relation de Knudsen pour décrire la conduction gazeuse :

$$\lambda_{cg} = \frac{P \cdot \lambda_{g,0}}{1+2 \cdot \beta \cdot Kn} \quad (7)$$

La difficulté de cette relation réside dans la détermination de la valeur de la dimension caractéristique  $D$ . En effet, la taille des pores d'un aérogel est comprise entre quelques nm et quelques centaines de nm. Pour les *blankets* aérogels ce nombre peut s'étendre jusqu'à des centaines de  $\mu\text{m}$  en raison des fissures entre fibres et aérogel. Certains auteurs considèrent que cette dimension est égale au diamètre moyen des pores (20 à 40 nm). Bien que la plupart des pores soient mésoporeux (2-50 nm), les macropores (>50 nm) peuvent représenter jusqu'à 30 % du volume poreux total. Pour tenir compte des différentes tailles de pore, Reichenauer et al. [6] ont étendu la relation de Knudsen à une distribution bimodale ou gaussienne. On peut ainsi considérer l'influence des mésopores et celle des macropores séparément :

$$\lambda_{cg} = \frac{P_{meso} \cdot \lambda_{g,0}}{1+2 \cdot \beta \cdot \frac{l}{D_{meso}}} + \frac{P_{macro} \cdot \lambda_{g,0}}{1+2 \cdot \beta \cdot \frac{l}{D_{macro}}} \quad (8)$$

Par analyse MEB, nous avons déduit dans le cas de nos aérogels que  $P_{meso} = 70 \%$  ,  $D_{meso} = 40 \text{ nm}$  ,  $P_{macro} = 30 \%$  ,  $D_{macro} = 125 \text{ nm}$ .

### 3.1.3. Transfert radiatif

Le flux radiatif est généré par émission entre les particules de silice. Les aérogels absorbent et réémettent les radiations mais ne les diffusent pas car la taille des pores est très faible devant les longueurs d'onde en jeu. L'aérogel de silice est considéré comme un matériau homogène.

Le transfert radiatif dépend de l'épaisseur optique du matériau :

$$\tau(\lambda) = \frac{d}{l_{pht}} = e(\lambda) \cdot \rho \cdot d = -\ln(T_\lambda) \quad (9)$$

Pour un aérogel optiquement épais,  $\tau(\lambda) \gg 1$  , le transfert radiatif est assimilé à un phénomène diffusif. Il est décrit par l'approximation de Rosseland :

$$\lambda_r = \frac{16 \cdot n^2 \cdot \sigma \cdot T r^3}{3 \cdot \rho \cdot K_R(T)} \quad (10)$$

Le coefficient de Rosseland  $K_r(T)$  peut se trouver en mesurant l'évolution de la conductivité thermique effective de l'aérogel en fonction de la température et sous vide. En négligeant la variation de  $\lambda_{cs}$  avec la température, le tracé de  $\lambda_{eff} = \lambda_{cs} + \lambda_r$  vs  $T_r^3$  est une droite dont la pente est  $\frac{16.n^2\sigma}{3.\rho.K_R(T)}$ .

Une autre approche plus théorique consiste à calculer le coefficient de Rosseland par l'équation suivante:

$$\frac{1}{K_R} = \int_0^\infty \frac{\partial E_{b\Lambda}(T)}{\partial E_b(T)} \frac{1}{e(\Lambda).\rho} d\Lambda \quad (11)$$

Le calcul de  $e(\Lambda)$  s'effectue à l'aide de mesure en transmission infrarouge du matériau et de la loi de Beer :

$$e(\Lambda) = -\frac{\ln(T_\Lambda)}{d.\rho} \quad (12)$$

C'est cette dernière méthode que nous avons utilisé pour mesurer  $e(\Lambda)$ , à l'aide d'un spectroscope à Transformée de Fourier TENSOR. 2 mg d'aérogel ont été réduit en poudre et mélangé à 200 mg de KBr, puis le tout a été pressé en une pastille. L'épaisseur équivalente de la pastille est estimée à [12]:

$$d = \frac{M_{pastille} \cdot m_{aerogel}}{\rho \cdot A} \quad (13)$$

### 3.2. Blankets aérogels

Le fait d'ajouter une phase fibreuse pour améliorer les propriétés mécaniques peut impacter le transfert de chaleur. Les laines ou mats de fibres ajoutés ont généralement une conductivité thermique bien plus élevée que l'aérogel natif. Cependant, on observe que le composite *blanket* aérogel a une conductivité thermique à peine plus élevée que celle de l'aérogel natif monolithique.

#### 3.2.1. Impact des fibres sur la conduction

Lorsque l'on réalise un composite mat fibreux / aérogel, la phase aérogel est insérée entre les fibres et diminue le nombre de contacts entre celles-ci, ce qui a pour effet de restreindre la conduction solide par les fibres. De plus, l'impact des fibres sur la conductivité thermique effective est directement relié à la fraction volumique des fibres, or la plupart des *blankets* aérogels ont moins de 5 % de fibres en volume.

Un modèle issu de l'analogie électrique et couramment utilisé pour inclure les fibres dans le transfert thermique d'un matériau composite est [13]:

$$\lambda_{c,eff} = (1 - \sqrt{v_f})\lambda_{c,a} + \frac{\lambda_{c,a} \cdot \sqrt{v_f}}{(1 - \sqrt{v_f})(1 - \lambda_{c,a}/\lambda_{c,f})} \quad (14)$$

D'après l'équation précédente, on remarque que la valeur de la conductivité thermique des fibres n'a que très peu d'effet tant que la fraction volumique de fibres reste faible.

#### 3.2.2. Impact des fibres sur le rayonnement

L'ajout de fibres a également un effet positif sur le transport radiatif. Les aérogels de silice sont des matériaux semi-transparents et n'absorbent pas beaucoup le rayonnement courtes et grandes longueurs d'onde alors que les fibres le font. Pour tenir compte des fibres dans le transfert radiatif, il suffit de remplacer dans la formule (10) l'indice de réfraction par :

$$n_b = v_f n_f + (1 - v_f) n_a \quad (15)$$

et le coefficient de Rosseland par :

$$K_{Rb} = m_a K_{Ra} + m_f K_{Rf} \quad (16)$$

en considérant qu'aucune réaction chimique n'ait eu lieu entre les fibres et l'aérogel.

$K_{Rf}$  est obtenu selon la même méthodologie que  $K_{Ra}$ , par mesures en transmission sur des échantillons de mat fibreux avant imprégnation. Les résultats en transmission incluent les effets de diffusion, de réflexion et d'absorption des fibres.

## 4. Résultats et discussions

### 4.1. Choix des modèles

Concernant la conduction solide, le modèle des phonons de Fricke a des bases convaincantes mais sous-estime la conductivité. Les modèles empiriques ont moins de 10 % d'écart pour des aérogels de densité entre 70 et 200 kg.m<sup>-3</sup>. Nous avons choisi pour l'étude présente de travailler avec le modèle de Kamiuto (eq. (4) et (5)). Concernant la conductivité thermique gazeuse, nous avons choisi de travailler avec l'équation de Knudsen bimodal en tenant compte du couplage à l'aide d'un facteur d'accommodation de 2,2.

Concernant la conductivité radiative, les valeurs des mesures en transmission pour des échantillons d'épaisseur 2 mm n'excèdent pas 0,1 entre les longueurs d'onde 2 µm – 25 µm. Nous pouvons ainsi utiliser l'approximation de Rosseland valide pour des aérogels optiquement épais (eq. (10)) et des mesures en transmission infrarouge pour déterminer le coefficient de Rosseland (eq. (11),(12)).

La prise en compte des fibres se fait grâce aux équations (14-16).

### 4.2. Validation expérimentale

Afin de valider les modèles présentés, quelques échantillons de *blanket* aérogel ont été caractérisés à l'aide d'un fluxmètre thermique FOX 150 de précision +/- 1 % en fonction de la température et de la pression. Ces échantillons ont les caractéristiques suivantes :

- Densité de 90 à 200 kg.m<sup>-3</sup>
- Fraction volumique de fibres de 1 % à 8 %
- Fibres en PET ou en verre

### 4.3. Résultats

La figure (1a) représente l'évolution de la conductivité solide des *blankets* aérogels dus au squelette, au gaz et aux fibres en fonction de sa fraction volumique de fibres selon l'équation (14). Les deux courbes sont très proches malgré la différence de conductivité des fibres de verre et des fibres de PET. La figure (1b) représente l'évolution de la conductivité radiative des deux *blankets* aérogels en fonction de la fraction volumique de fibres. Celle-ci décroît car les fibres sont plus opaques aux rayonnements infrarouges que l'aérogel de silice natif. L'augmentation de la densité ou de l'absorption des fibres favorise cette décroissance. La figure (1c) montre la conductivité thermique effective des *blankets* aérogels comme étant la somme de (a) et (b) ainsi que quelques points expérimentaux. Cette courbe en cloche montre qu'il existe une plage optimale de fraction volumique comprise entre 2% et 6 % de fibres. Le point expérimental à 8 % est bien au-dessus du modèle proposé car il provient d'une mesure sur un échantillon plus épais. L'augmentation de l'épaisseur de l'échantillon a pour effet

d'augmenter la conductivité radiative [14] mais cet « effet d'épaisseur » n'est pas pris en compte dans nos modèles. Cette étude ne tient pas compte du diamètre des fibres et de leur longueur qui peuvent avoir également un impact sur le transfert thermique.

La figure 2 montre l'évolution de la conductivité thermique des *blankets* aérogels en fonction des variables principales. Quelques points expérimentaux confirment les tendances des courbes avec 15 % d'erreur au maximum. On retrouve un résultat classique sur la dépendance en densité. L'aérogel de silice atteint un minimum pour une densité avoisinant les  $160 \text{ kg.m}^{-3}$ . Lorsque la densité est trop faible le transfert par rayonnement devient prépondérant et lorsque qu'elle devient trop élevée, le squelette solide est plus présent augmentant ainsi la conduction solide. La courbe en pression est également caractéristique des aérogels de silice. On constate qu'au-dessous d'une pression de 0,1 bar la composante gazeuse est quasiment nulle et on se retrouve avec un super-isolant très performant. L'allure de la courbe en température est fortement corrélée à celle de la conductivité radiative. La température influe en  $T^3$ , limitant fortement une application à haute température. Les aérogels étudiés sont destinés à l'isolation thermique dans le bâtiment, leur plage de température ne devrait donc pas excéder  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

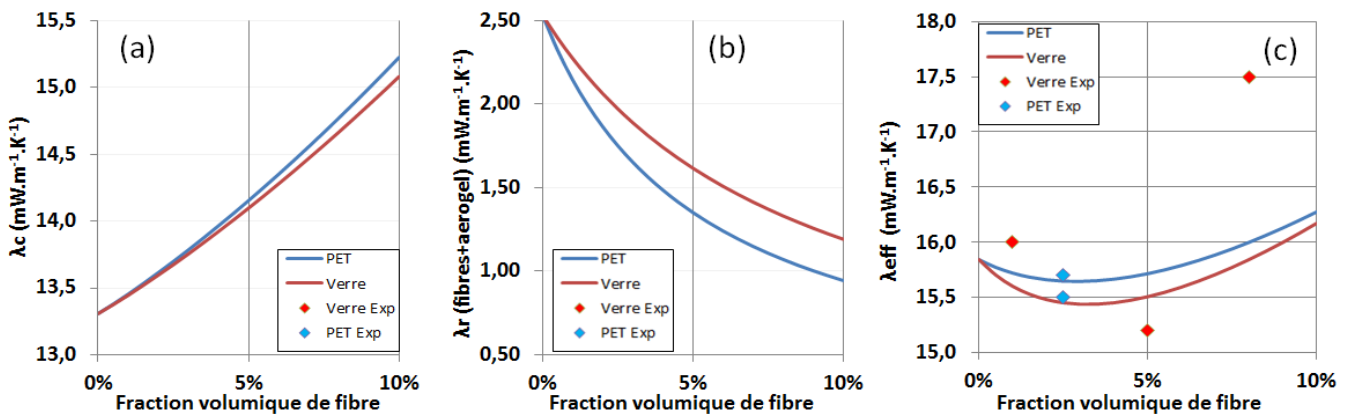


Figure 1 : Influence de la fraction volumique sur: (a) la conduction, (b) le rayonnement, (c) la conductivité effective du blanket aérogel

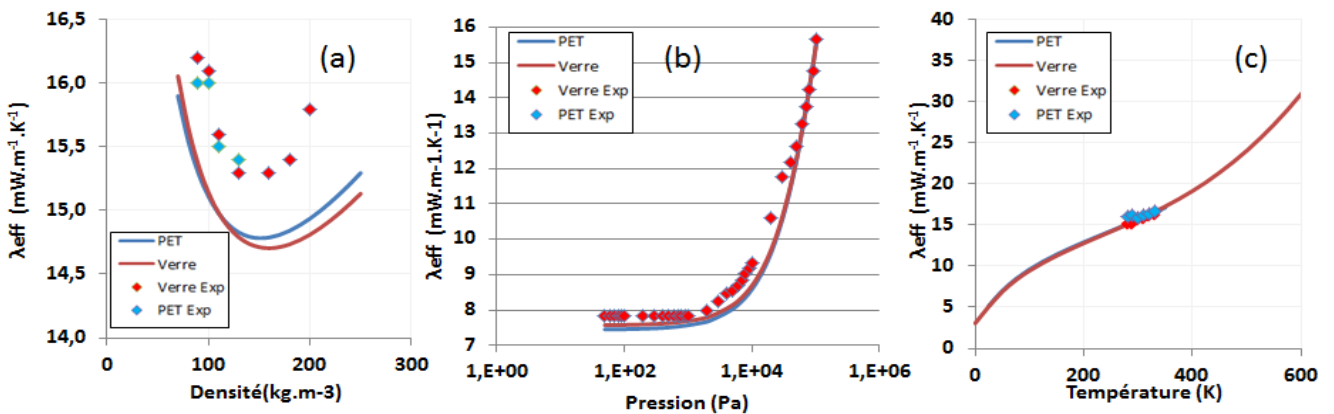


Figure 2 : Evolution de la conductivité thermique effective des blankets aérogels en fonction de: (a) la densité de l'aérogel, (b) la température, (c) la pression

On peut conclure deux choses importantes à partir de ces résultats: d'une part les fibres utilisées n'ont que très peu d'influence sur la conductivité thermique du composite *blanket* tant qu'on est au-dessous de 5 % de fibres, les courbes sont à peine supérieures à celle de l'aérogel natif. Deuxièmement ce résultat est vrai quel que soit le type de fibre utilisé pour renforcer l'isolant pour les deux types de fibres mis en œuvre.

## 5. Conclusion

L'étude présente a pour but d'approfondir les connaissances sur un nouveau matériau super-isolant pour des applications dans le bâtiment : le *blanket* aérogel. Un process innovant a permis de synthétiser deux types de *blankets* aérogels légers, résistants, hydrophobes et avec d'excellentes caractéristiques thermiques. Les modèles théoriques et expérimentaux proposés nous ont permis de mieux appréhender le comportement du matériau soumis à différents environnements ( $T, P, g$ ) et selon différents paramètres de conception ( $\rho, f_v$ ). Ils ont pour but d'être le plus simple possible pour agir sur les variables dimensionnantes rapidement. Cependant ils ne prennent pas en compte tous les paramètres réellement en jeu. Pour obtenir une description du transfert de chaleur plus précise, les modèles numériques sont les plus appropriés. Ils utilisent la microstructure de l'aérogel, l'hétérogénéité et les interactions entre les phases en simulant la formation du matériau au cours du processus sol-gel et en appliquant des équations plus complexes sur la géométrie résultante, avec l'inconvénient d'être plus gourmands en ressources et temps de calcul.

## Références

- [1] J. Fricke et T. Tillotson, « Aerogels: production, characterization, and applications », *Thin Solid Films*, vol. 297, n° 1, p. 212–223, 1997.
- [2] M. Koebel, A. Rigacci, et P. Achard, « Aerogel-based thermal superinsulation: an overview », *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, vol. 63, n° 3, p. 315-339, sept. 2012.
- [3] « HomeSkin | HomeSkin – Thinner Insulation Systems - <http://homeskin.net/> ». .
- [4] L.W Hrubesh et R.W Pekala., « Thermal properties of organic and inorganic aerogels », *J. Mater. Sci.*, vol. 9, n° 3, p. 731-738, 1994.
- [5] U. Heinemann, R. Caps, et J. Fricke, « Radiation-conduction interaction:an investigation on silica aerogels », *Int J Heat Mass Transf.*, vol. 39, n° 10, p. 2115-2130, 1996.
- [6] G. Reichenauer, U. Heinemann, et H.-P. Ebert, « Relationship between pore size and the gas pressure dependence of the gaseous thermal conductivity », *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 300, n° 1-2, p. 204-210, juin 2007.
- [7] K. Swimm, G. Reichenauer, S. Vidi, et H.-P. Ebert, « Gas pressure dependence of the heat transport in porous solids with pores smaller than 10  $\mu\text{m}$  », *Int. J. Thermophys.*, vol. 30, n° 4, p. 1329–1342, 2009.
- [8] J. Fricke, E. HüMmer, H.-J. Morper, et P. Scheuerpflug, « Thermal properties of silica aerogels », *J. Phys. Colloq.*, vol. 24, n° C4, p. C4-87-C4-97, avr. 1989.
- [9] P. Scheuerpflug, H.-J. Morper, et G. Neubert, « Low-temperature thermal transport in silica aerogels », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 24, n° 8, p. 1395, 1991.
- [10] K. Kamiuto, « Combined conductive and radiative heat transfer through evacuated silica aerogel layers », *Int. J. Sol. Energy*, vol. 9, n° 1, p. 23–33, 1990.
- [11] M. G. Kaganer, *Thermal insulation in cryogenic engineering*. Israel Program for Scientific Translations, 1969.
- [12] G. Wei, Y. Liu, X. Zhang, et X. Du, « Radiative heat transfer study on silica aerogel and its composite insulation materials », *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 362, p. 231-236, févr. 2013.
- [13] F. Cardarelli, *Materials handbook: a concise desktop reference*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [14] B. G. Rennex, « Thermal parameters as a function of thickness for combined radiation and conduction heat transfer in low-density insulation », *J. Build. Phys.*, vol. 3, n° 1, p. 37–61, 1979.