HAL
open science

Transfert de chaleur dans les blankets aérogels de silice

Kevin Nocentini, Pascal Henry Biwole, Patrick Achard

To cite this version:

Kevin Nocentini, Pascal Henry Biwole, Patrick Achard. Transfert de chaleur dans les blankets aérogels de silice. XIIIème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes , May 2017, Saint-Lô, France. hal-01661814

HAL Id: hal-01661814

https://minesparis-psl.hal.science/hal-01661814

Submitted on 12 Dec 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

XIIIème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois
sur la Thermique des Systèmes
22-24 mai 2017, LUSAC
Saint-Lô, France

CIFQ2017 / ART-03-16

TRANSFERT DE CHALEUR DANS LES « BLANKETS » AEROGELS DE SILICE

Kévin **NOCENTINI** [a,*], Pascal **BIWOLE** [a, b], Patrick **ACHARD** [a]

[a] *MINES ParisTech, PSL Research University PERSEE – Centre procédés énergies renouvelables et systèmes énergétiques, Sophia Antipolis, FRANCE*

[b] *Laboratoire J.A. Dieudonné UMR CNRS 7351, Université Côte d'Azur, Nice, FRANCE*

RÉSUMÉ

Les blankets aerogels de silice sont des matériaux composites composés de nanoparticules de silice interconnectées et de renforts fibreux. Leur structure meso-poreuse en fait d'excellents isolants thermiques et suscitent beaucoup d'intérêt dans le secteur du bâtiment. La présente étude propose des modèles de conductivité thermique des différents modes de tranfert thermique au sein de ce matériau ainsi qu'un modèle de conductivité thermique effective. On s'intéresse tout particulièrement à l'évolution de la conductivité thermique effective en fonction de la densité du matériau, de sa température, de la pression et de l'humidité relative. Les résultats issus des modèles sont comparés à quelques valeurs expérimentales.

Mots Clés : *Aérogel de silice, Isolation thermique, Conductivité thermique effective*

NOMENCLATURE

Symboles :

A	surface de l'élement, m²
d	épaisseur, mm
D	dimension caractéristique, nm
e^*	extinction spécifique effective, m².kg^{-1}
E^*	coefficient d'extinction effectif, m^{-1}
E_b	emittance totale du corp noir, W.m^{-2}
$E_{b\Lambda}$	emittance monochromatique du corp noir, W.m^{-3}
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
Pg	pression du gaz, Pa
T	température, K
Tr	température radiante moyenne, K
T_Λ	transmittance
v	fraction volumique

Lettres grecques :

β	coefficient dépendant du type de gaz et de la température
λ	conductivité thermique, W.m^{-1}.K^{-1}
Λ	longueur d'onde, nm
v	vitesse du son, m.s^{-1}
ρ	densité, kg.m^{-3}
σ	constante de Stefan-Boltzmann, W.m^{-2}.K^{-4}
τ	épaisseur optique

Indices / Exposants :

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

* Kévin NOCENTINI
Adresse électronique : kevin.nocentini@mines-paristech.fr

1. INTRODUCTION

Les aérogels de silice sont des matériaux légers, transparents, mésoporeux préparés par synthèse sol-gel et séchés par CO2 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^{-3}), une grande surface spécifique (500-1300 m².kg^{-1}) , une faible propagation du son en leur sein (50-300 m.s^{-1}) et une conductivité thermique (0,01 – 0,02 W.m^{-1}.K^{-1}) 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 [3]. En 2012, en moyenne 54 % de la consommation énergétique des bâtiments était due aux déperditions thermiques à travers l'enveloppe. Une utilisation efficace des super-isolants permettrait de réduire de 75 % cette consommation [4].

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 d'aérogels car c'est un long process discontinu qui necessite de fortes pressions et qui ne permet de sécher que des lots de matériau.

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 par FTIR et sur des analogies electriques pour la prise en compte des fibres.

2. DESCRIPTION DU MATERIAU

Les matériaux étudiés sont des blankets aérogels conçus par la société ENERSENS dans le cadre du projet européen HOMESKIN [5].

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' hexamethyldisiloxane (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.

La réaction de silylation substitue les groupements hydrolysables tels que les groupements silanols et ethoxys et permet au gel de silice de retrouver ses dimensions initiales après la relaxation des contraintes capillaires lors du séchage (spring back effect) [6]. Enfin, le gel composite que l'on obtient est séché à pression ambiante pendant une heure. La fraction volumique de fibres du composite est 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. Le tableau 1 montre les principales propriétés des blankets réalisés.

Tableau 1 : Propriétés des blankets étudiés

densité	110 kg. m^{-3}
Conductivité thermique	0,015 W.m^{-1}.K^{-1}
Résitance à la traction	0,8 kPa
Contrainte en compression	59 kPa
Fraction volumique de fibres	1% (verre) et 2.5 % (PET)

3. MODELES DE CONDUCTIVITE THERMIQUE

3.1. Aérogel de silice natifs

Dans le but d'améliorer la fabrication des blankets aérogels de silice en tant que super isolant thermique, il est nécessaire de comprendre les modes de transfert de chaleur au sein de l'aérogel de silice natif.

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 qu'un modèle de base pour la conductivité thermique d'un aérogel de silice est :

(1)

Il a ensuite été prouvé que ces modes de transfert n'étaient pas indépendants et qu'il fallait ajouter un terme de couplage à l'équation précédente :

(2)

Le couplage entre rayonnement et conductions (solide et gazeuse) a largement été étudié pour des matériaux poreux conventionnels et a été rapporté par Heinemann [7]. 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. [8]. 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.

Quelques études se sont proposées de modéliser théoriquement ce phénomène de couplage. Zhao et al. [9] ont proposé un modèle complet de couplage en utilisant un arrangement série/parallèle et les paramètres morphologiques de l'aérogel (taille des particules, densité, structure). Cependant, ce modèle nécessite beaucoup de temps et de puissance de calcul et n'est pas pratique pour des applications d'ingénierie en isolation thermique. Bi et al. [10] ont simplifié l'étude de Zhao et proposent une formule théorique simplifiée du terme de couplage. Enfin Swimm et al. [11] proposent de tenir compte de ce couplage en multipliant la conduction gazeuse dans les mésopores 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. Plus fondamentalement, il dépend du ratio molaire *précurseur de silice/eau*, de la concentration des précurseurs, du catalyseur et de sa concentration, et du solvant utilisé.

3.1.1. Conduction solide

La conduction solide au sein de l'aérogel dépend de la structure du squelette, de l'inter connectivité des particules primaires, et de la structure chimique. Fricke [12] 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 chaines de particules solides du squelette.

(3)

Pour des aérogels avec une densité comprise entre 50 $kg.m^{-3}$ et 300 $kg.m^{-3}$, la vitesse de propagation du son varie entre 140 $m.s^{-1}$ et 340 $m.s^{-1}$. Pour la silice, elle est de l'ordre de 5000 à 6000 $m.s^{-1}$. 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. [13] et Kamiuto [14] ont observé une proportionnalité entre la conductivité solide et la conductivité du squelette.

(4)

Scheuerpflug et al. détermina *r* expérimentalement en fonction de la densité pour des aérogels de densité comprise entre 70 et 260 $kg.m^{-3}$:

(5)

Kamiuto a affiné cette relation avec :

(6)

3.1.2. Conduction gazeuse

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

(7)

Lorsque Kn >> 1 le transfert est moléculaire et lorsque Kn <<1 le transfert est diffusif.

Kaganer [15] a introduit la relation de Knudsen pour décrire la conduction gazeuse :

(8)

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 µm 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. [8] 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 :

(9)

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 :

(10)

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 :

(11)

L'indice de réfraction *n* se déduit par la relation de Claussius-Mossotti [16]:

(12)

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 avec la température, le tracé de $\lambda_{eff} = \lambda_{cs} + \lambda_r$ vs est une droite dont la pente est $(16.n^2\,\sigma)/(3.\rho.K_R\,(T))$.

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

(13)

Le calcul de $e^*(\Lambda)$ s'effectue à l'aide de mesure en transmission infrarouge du matériau et de la loi de Beer : $e*(\Lambda) = -$ (14)

C'est cette dernière méthode que nous avons utilisé pour mesurer e*(Λ), à l'aide d'un spectroscope à Transformée de Fourrier TENSOR. 2 mg d'aérogel ont été réduit en poudre et mélangé à 200 mg de KBr (transparent aux infrarouges), puis le tout a été pressé en une pastille. L'épaisseur équivalente de la pastille est estimée à [17]:

(15)

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 à 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, limitant fortement un accroissement de la conduction thermique.

Un modèle issu de l'analogie électrique et couramment utilisé pour inclure les fibres dans le transfert thermique d'un materiau composite est [18]:

(16)

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.

De plus, lors du séchage, la présence de fibres dans la phase aérogel crée des fissures à l'interface fibres/aérogel. En s'inspirant de l'équation (9), on peut modéliser l'impact de ces fissures en considérant une distribution trimodale mesopores/macropores/fissures.

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 (11) l'indice de réfraction par :

(17)

et le coefficient de Rosseland par :

(18)

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

est obtenu par mesures en transmission sur les fibres de la même manière que . Les résultats en transmission incluent les effets de diffusion, de réflexion et d'absorption des fibres.

4. RESULTATS 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^{-3}. Nous avons choisi pour l'étude présente de travailler avec le modèle de Kamiuto (eq. (4) et (6)). Concernant la conductivité thermique gazeuse, nous avons choisi de travailler avec l'équation de Knudsen trimodale en tenant compte du couplage à l'aide d'un facteur d'accommodation de 2,5. Ce facteur a été déterminé en calculant le terme de couplage λ grâce au modele de Bi et al.[10]. Par analyse MEB, nous avons déduit dans le cas de nos blankets aérogels que P_{meso} = 70 % , D_{meso} =40 nm , P_{macro} = 15 % , D_{macro} =300 nm, $P_{fissures}$ 15 %,$D_{fissures}$ = 300 µm. Pour la conductivité radiative, nous utilisons l'approximation de Rosseland valide pour des aérogels optiquement épais (eq. (11)) et des mesures en transmission infrarouge pour déterminer le coefficient de Rosseland (eq (13-14)). La prise en compte des fibres se fait grâce aux équations (16-18).

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 %. Ces échantillons ont les caractéristiques suivantes :

- Densité de 90 à 200 kg.m^{-3}
- Fraction volumique de fibres de 1 % à 8 %
- Fibres en PET ou en verre

Les paramètres qui varient sont la température et la pression.

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 (16). 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 décroit 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. Cette étude est cependant simplifiée car elle 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 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 comparable à des panneaux d'isolation sous vide [19]. L'allure de la courbe en température est fortement corrélée à celle de la conductivité radiative. La température influe en T³, 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°C.

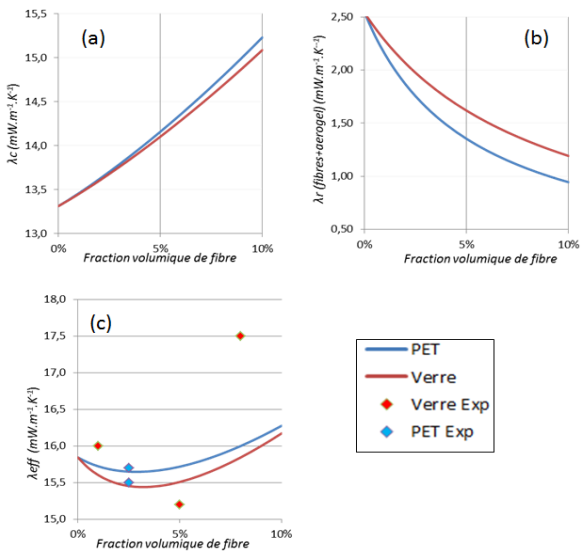

Figure 1: Influence de la fraction volumique sur: (a) la conduction, (b) le rayonnement, (c) la conductivité effective du blanket aérogel

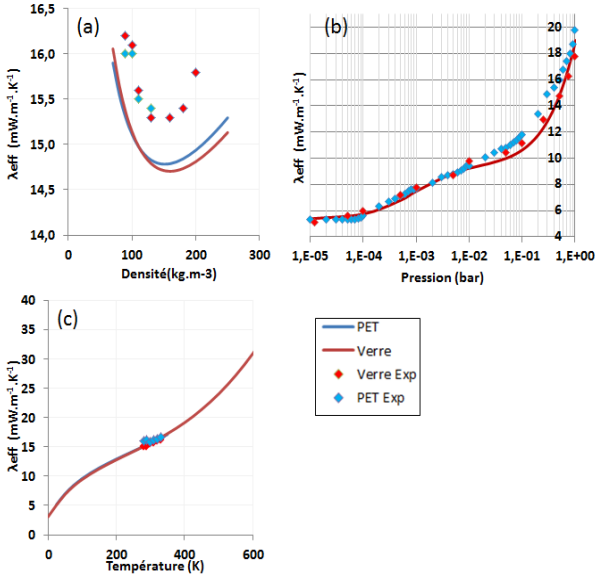

Figure 2 : Evolution de la conductivité thermique effective des blankets aérogels en fonction de: (a) la densité de l'aérogel, (b) la pression, (c) la température

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 fibres utilisés 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,Pg) et selon différents paramètres de conception (ρ,v_f). 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, no 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, no 3, p. 315-339, sept. 2012.

[3] « Directive of European parliament and of the council amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency », 2012.

[4] M. **KOEBEL**, L. **HUBER**, S. **ZHAO**, et W. J. **MALFAIT**, « Breakthroughs in cost-effective, scalable production of superinsulating, ambient-dried silica aerogel and silica-biopolymer hybrid aerogels: from laboratory to pilot scale », *J. Sol-Gel Sci. Technol., vol. 79, no 2, p. 308-318*, août 2016.

[5] « HomeSkin | HomeSkin – Thinner Insulation Systems - http://homeskin.net/ ». .

[6] D. M. **SMITH**, R. **DESHPANDE**, et C. J. **BRINKE**, « Preparation of low-density aerogels at ambient pressure », *in MRS Proceedings*, 1992, vol. 271, p. 567.

[7] **HEINEMANN** U., **CAPS** R., et **FRICKE** J., « Radiation-conduction interaction:an investigation on silica aerogels », *Int J Heat Mass Transf., vol. 39, no 10, p. 2115-2130*, 1996.

[8] 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, no 1‑2, p. 204-210*, juin 2007.

[9] J.-J. **ZHAO**, Y.-Y. **DUAN**, X.-D. **WANG**, et B.-X. **WANG**, « Effects of solid–gas coupling and pore and particle microstructures on the effective gaseous thermal conductivity in aerogels », *J. Nanoparticle Res., vol. 14, no 8*, août 2012.

[10] C. **BI**, G. H. **TANG**, Z. J. **HU**, H. L. **YANG**, et J. N. **LI**, « Coupling model for heat transfer between solid and gas phases in aerogel and experimental investigation », *Int. J. Heat Mass Transf., vol. 79, p. 126‑136*, déc. 2014.

[11] 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 µm », *Int. J. Thermophys., vol. 30, no 4, p. 1329–1342*, 2009.

[12] J. **FRICKE**, E. **HÜMMER**, H.-J. **MORPER**, et P. **SCHEUERPFLUG**, « Thermal properties of silica aerogels », *J. Phys. Colloq., vol. 24, no C4, p. C4-87-C4-97*, avr. 1989.

[13] P. **SCHEUERPFLUG**, H.-J. **MORPER**, et G. **NEUBERT**, « Low-temperature thermal transport in silica aerogels », *J. Phys. Appl. Phys., vol. 24, no 8, p. 1395*, 1991.

[14] K. **KAMIUTO**, « Combined conductive and radiative heat transfer through evacuated silica aerogel layers », *Int. J. Sol. Energy, vol. 9, no 1, p. 23–33*, 1990.

[15] M. G. **KAGANER**, Thermal insulation in cryogenic engineering. Israel Program for Scientific Translations, 1969.

[16] G. **POELZ**, « Aerogel in High Energy Physics », in *Aerogels, vol. 6, J. Fricke, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg*, 1986, p. 176-187.

[17] 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.

[18] F. **CARDARELLI**, Materials handbook: a concise desktop reference. *Springer Science & Business Media*, 2008.

[19] *S. E.* ***KALNÆS*** *et B. P.* ***JELLE****, « Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways », Appl. Energy, vol. 116, p. 355–375, 2014*