

# Analyse thermo-fiabiliste de matériaux poreux céramiques à haut taux de densification

F. Pennec<sup>1</sup>, A. Alzina<sup>1</sup>, B. Naït-ali<sup>1</sup>, N. Tessier-Doyen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CEC, ENSCI-GEMH, Limoges, France, {fabienne.pennec, arnaud.alzina, benoit.nait-ali, nicolas.tessier-doyen}@unilim.fr

**Résumé** — Une analyse fiabiliste de la conductivité thermique effective d'un matériau poreux est présentée. L'objectif est de déterminer la probabilité que la valeur de conductivité du matériau dépasse un seuil et d'évaluer la sensibilité de la conductivité thermique effective à la variabilité microscopique. Un couplage entre le modèle thermique et le modèle stochastique qui contient les lois des variables aléatoires est ainsi réalisé. La méthode développée est validée par des mesures de diffusivité thermique sur des échantillons de zircone dense.

**Mots clés** — homogénéisation, Monte-Carlo, indices de Sobol.

## 1 Contexte de l'étude

Les matériaux céramiques poreux sont utilisés comme isolant thermique dans de nombreux domaines tels que les industries métallurgiques et céramiques. Ces matériaux présentent en effet une bonne résistance aux chocs thermiques et une faible conductivité.

Le développement des matériaux poreux nécessite une connaissance approfondie de leurs propriétés physiques et notamment de leur conductivité thermique qui gouverne leur pouvoir d'isolation.

## 2 Démarche adoptée

La mesure expérimentale est un moyen efficace pour accéder à la valeur de la conductivité thermique effective mais des modèles par éléments finis ont l'avantage de pouvoir déterminer l'influence des paramètres de la structure poreuse sur le comportement thermique effectif du matériau et ainsi de mieux maîtriser ces caractéristiques thermiques. Les paramètres de la structure poreuse tels que la taille des pores, leur forme, leur agencement spatial, les conductivités thermiques de la matrice solide ou de l'air emprisonnée dans les pores sont souvent considérés comme des paramètres déterministes alors que leurs valeurs sont très sensibles au procédé d'élaboration. Il est important de prendre en compte la variabilité microscopique pour garantir une valeur limite de la conductivité thermique et pour connaître l'influence de la variabilité microscopique sur le comportement thermique effectif du matériau poreux.

Une étude précise du comportement thermique du matériau poreux nécessite la connaissance approfondie des caractéristiques thermiques de la partie solide (Figure 1). Ainsi une première analyse de l'influence de la variabilité microscopique de la partie solide (taille des grains, résistance de joints de grain, conductivité thermique du grain) est réalisée. Pour valider la méthode d'analyse thermo-fiabiliste, des mesures expérimentales sur des échantillons de Zircone dense sont pratiquées.

## 3 Mise en oeuvre de la méthode numérique

Un modèle éléments finis multi-échelle permettant d'estimer le comportement thermique équivalent d'un matériau hétérogène anisotrope dense en prenant en compte l'évolution des propriétés des matériaux et des propriétés géométriques de la structure a donc été développé. Pour s'approcher au mieux de la structure réelle du matériau zircone dense, des tessellations de Voronoï ont été générées en 3D sous SALOME [1] pour représenter la répartition aléatoire des grains (Figure 2). L'implémentation de la méthode d'homogénéisation thermique [2], permettant d'estimer la conductivité thermique du matériau homogène équivalent au matériau hétérogène réel, a ensuite été réalisée sous le code open source Code

Aster [3]. La prise en compte des variables microscopiques de la structure a nécessité de coupler le logiciel de simulation numérique avec le logiciel de traitement des incertitudes OpenTurns [4] pour réaliser des analyses de fiabilité (Méthode de Monte-Carlo)[5] et de sensibilité (indices de Sobol)[6]. L'influence de la taille des grains, de la conductivité du cristallite, de la valeur de résistance des joints de grains, du taux de porosité résiduel sur la conductivité thermique effective du matériau est ainsi estimée. La distribution de la conductivité thermique effective calculée est comparée aux valeurs de conductivité thermique obtenues par la méthode Flash Laser [7] sur une dizaine d'échantillons en zircon dense.

## 4 Résultats et conclusion

La figure 3 illustre la distribution de la conductivité thermique effective calculée obtenue avec la méthode de Monte-Carlo. Valeur moyenne et écart-type calculés se rapprochent des valeurs expérimentales mesurées. Sur la figure 4, le diagramme des indices de Sobol met en évidence le poids de chaque paramètre variable sur la conductivité thermique équivalente. Les résultats obtenus sont satisfaisants et encourage la poursuite de la méthode mise en œuvre pour prédire le comportement thermique puis mécanique de matériaux céramiques (poreux et réfractaires) avec prise en compte de la variabilité microscopique et s'affranchir à terme de nombreux essais de caractérisation.

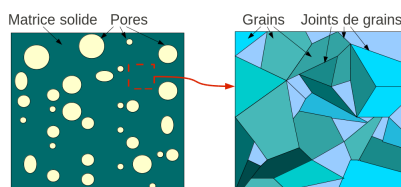


Fig. 1 - Représentations du matériau poreux et de sa partie solide.

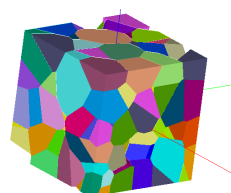


Fig. 2 - Cellule élémentaire comportant 150 grains, soit une taille moyenne de monocristal de 230nm, et un taux de porosité de 0.059.

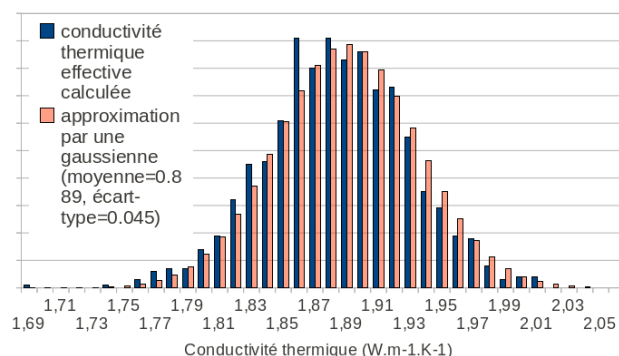


Fig. 3 - Distribution de la conductivité thermique effective de la zircon dense. La valeur moyenne et l'écart-type mesurés sur les échantillons sont respectivement  $0.885$  et  $0.03 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

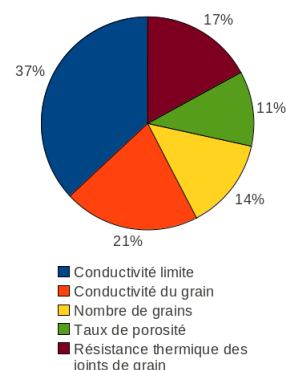


Fig. 4 - Indices totaux de Sobol reflétant l'importance des variables aléatoires sur la valeur de conductivité effective.

## Références

- [1] [www.salome-platform.org/](http://www.salome-platform.org/)
- [2] M. Bornert, T. Bretheau, P. Gilormini. *Homogénéisation en mécanique des matériaux 1 : Matériaux aléatoires élastiques et milieux périodiques*, Hermès Sciences Publicat., 21 janvier 2001.
- [3] [www.code-aster.org/](http://www.code-aster.org/)
- [4] [www.openturns.org/](http://www.openturns.org/)
- [5] M.Lemaire. *Fiabilité des structures - Couplage mécano-fiabiliste statique*, Hermes Sciences, 2005.
- [6] I.M. Sobol. *Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models*, Mathematical Modelling and Computational Experiments, 1(4), page407-page414, 1993.
- [7] B. Naitali. *Elaboration, caractérisation et modélisation de matériaux poreux. Influence de la structure poreuse sur la conductivité thermique effective*, PhD thesis, Limoges University, 2005.