



**HAL**  
open science

## Caractérisation du réseau de porosité d’une céramique de dioxyde d’uranium en vue de la modélisation de sa conductivité thermique

J. Meynard, R. Masson, M. Garajeu, Michel Bornert, C. Duguay, A. Monnier

### ► To cite this version:

J. Meynard, R. Masson, M. Garajeu, Michel Bornert, C. Duguay, et al.. Caractérisation du réseau de porosité d’une céramique de dioxyde d’uranium en vue de la modélisation de sa conductivité thermique. Journée de présentation des thèses de l’ED353, May 2018, Marseille, France. cea-02400203

**HAL Id: cea-02400203**

**<https://cea.hal.science/cea-02400203>**

Submitted on 21 Feb 2020

**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.

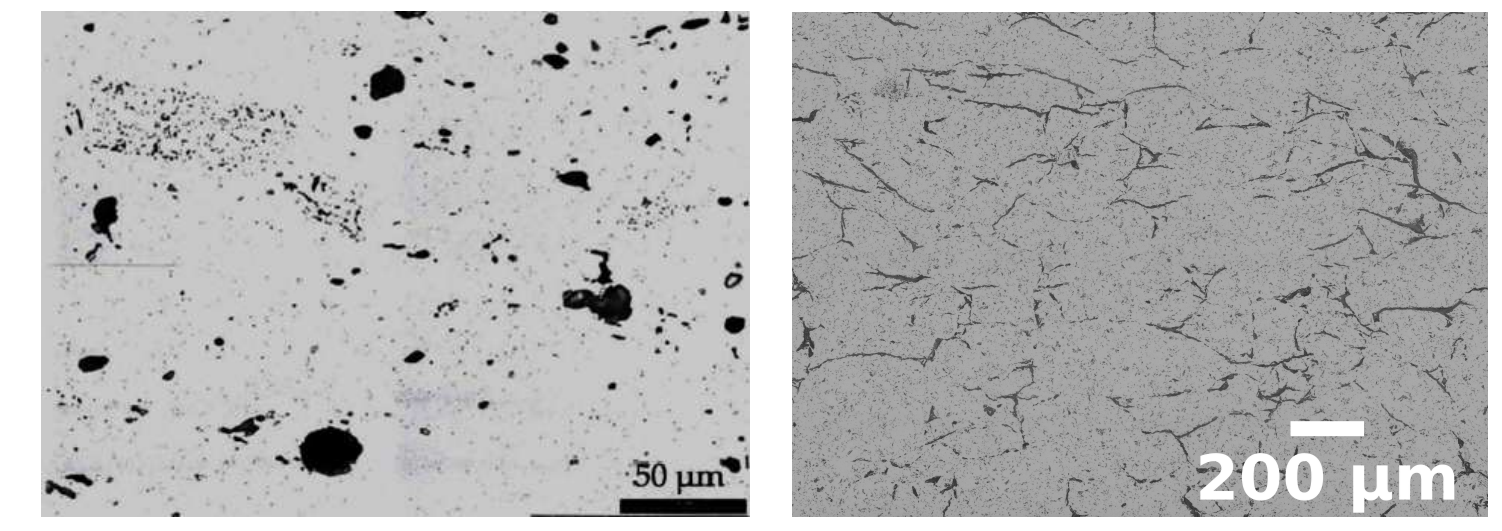
L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## Contexte et objectifs

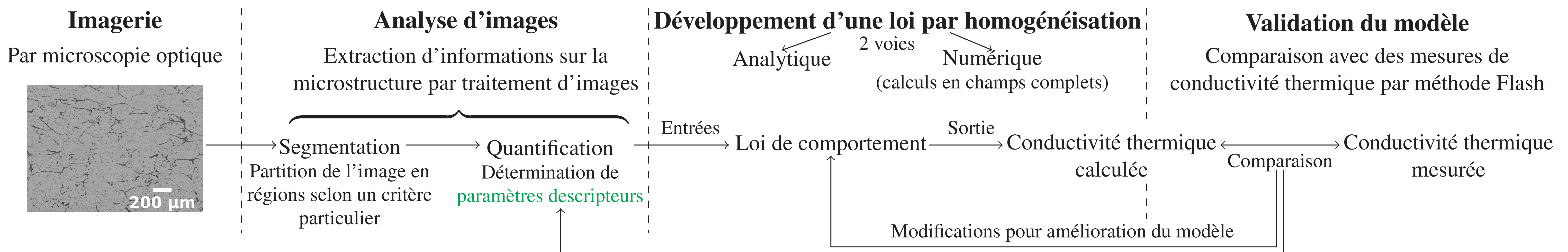
Les céramiques  $UO_2$  obtenues par frittage possèdent une microstructure composée d'une matrice solide d' $UO_2$  et de deux familles de porosités (l'une avec des pores de forme sphérique et l'autre avec des pores lenticulaires). Le procédé de fabrication des combustibles nucléaires  $UO_2$  et leur séjour en réacteur impacte leur microstructure, notamment leur réseau de porosités. Les modèles semi-empiriques usuels de type Maxwell-Eucken (établis pour des combustibles standard) ne sont pas représentatifs de l'influence de la microstructure sur la conductivité thermique des combustibles d'étude.

**Objectifs** : - Étude de l'influence de la morphologie des porosités sur la conductivité thermique d'un combustible  
- Développement d'un modèle pour intégration dans un code de calcul thermomécanique



Combustible standard Combustible d'étude

## Méthodologie



## Résultats

## Homogénéisation analytique avec le modèle "milieu dilué" [1]

Hypothèse de séparation d'échelle pour l'influence de la porosité lenticulaire (représentée par des ellipses de rapport de forme  $\omega \ll 1$ ) et celle de la porosité sphérique répartie de façon isotrope

$$\lambda = \kappa(c_s) \kappa(c_l) \lambda_{UO_2} \quad (1)$$

avec  $\lambda$  et  $\lambda_{UO_2}$  les conductivités thermiques respectives du combustible d'étude et de la matrice d' $UO_2$  100% dense,  $\kappa(c_s)$  et  $\kappa(c_l)$  les facteurs donnant respectivement l'influence la porosité sphérique  $c_s$  et celle de la porosité lenticulaire  $c_l$

Influence de la porosité sphérique,  $\kappa(c_s)$   $\kappa(c_s) = \left\{ 1 - \frac{3}{2} c_s \right\} I$

La conductivité thermique de la porosité sphérique est supposée négligeable par rapport à celle de la matrice  $UO_2$ .

Influence de la porosité lenticulaire,  $\kappa(c_l)$  (approximation au premier ordre)

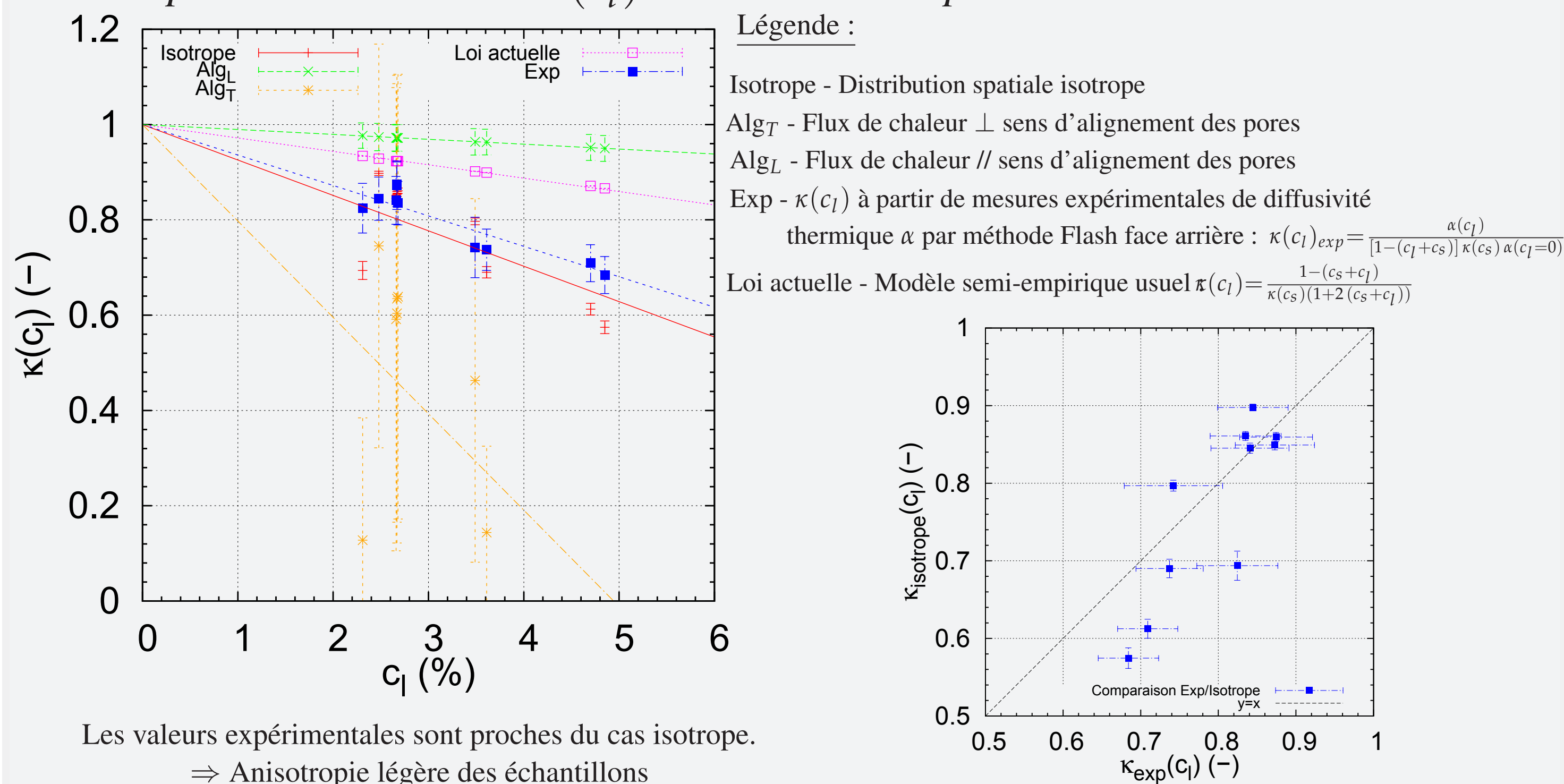
$$\kappa(c_l) \approx (1 - c_l) I + c_l \left( 1 - \frac{2}{\pi \omega} \right) \iint u_3^k \otimes u_3^k W(\theta) \sin \theta d\theta d\phi \quad (2)$$

avec  $c_l$  la fraction volumique de porosité lenticulaire,  $I$  la matrice unité de l'espace,  $(u_1^k, u_2^k, u_3^k)$  une base orthonormée de l'espace telle que  $u_3^k$  soit parallèle à l'axe de révolution de l'ellipse  $k$  et  $W(\theta)$  la fonction de distribution d'orientations  $\theta$ .

⇒ Paramètres descripteurs de la microstructure :

- Fractions volumiques des deux familles de porosités → Obtenues à l'aide de mesures par imbibition
- Orientation des pores lenticulaires → Etude de deux distributions  $W(\theta)$  :  
1) Alignement des pores :  $W(\theta) = \frac{1}{2\pi}$ ,  
2) Distribution isotrope :  $W(\theta) = \frac{\delta(\theta)}{2\pi}$  (avec  $\delta$  la fonction de Dirac)
- Forme des pores lenticulaires → Caractérisation de  $\omega$  par traitement d'images

Comparaison du modèle  $\kappa(c_l)$  à des valeurs expérimentales



Les valeurs expérimentales sont proches du cas isotrope.  
⇒ Anisotropie légère des échantillons

## Développement du traitement d'images [2]

Objectif : Détermination des paramètres descripteurs décrivant la porosité lenticulaire

Caractérisation du rapport de forme  $\omega$  sur des images 2D

Définition du rapport de forme  $\omega$  d'une ellipse :  $\omega = \frac{b}{a}$

Hypothèses :

a) Les objets observés sont considérés comme des coupes transversales d'ellipses.

$$c_{s,obs} = \frac{\pi N a_m b_m}{S_{img}} \quad (3)$$

avec  $c_{s,obs}$  la valeur de fraction surfacique obtenue par analyse d'images,  $N$  le nombre d'objets présents sur l'image,  $a_m$  et  $b_m$  les valeurs moyennes des demi-axes des ellipses,  $S_{img}$  la surface totale de l'image étudiée.

b) Le demi-grand axe d'une ellipse est approximé pour des pores branchés à la taille de la branche mère du squelette de cette porosité.

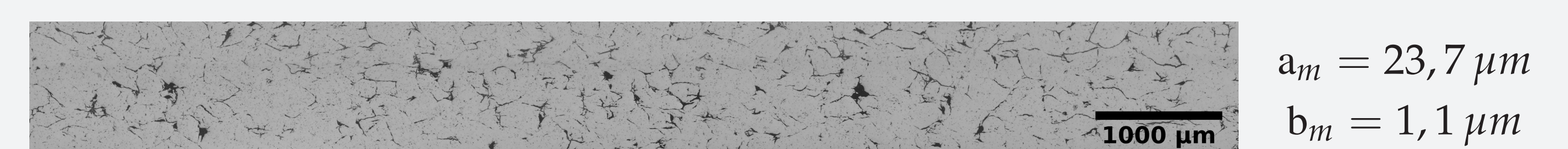
$$N a_m \approx L_{tot} \quad (4)$$

avec  $L_{tot}$  la longueur totale des branches mères des objets après squelettisation

D'où

$$\omega = \frac{S_{img} N}{\pi c_{s,obs} L_{tot}^2} \quad (5)$$

Détermination du rapport de forme  $\omega$  des ellipses équivalentes représentant le réseau de porosités d'un combustible d'étude :

Combustible d'étude A ( $\omega = 0,03 \pm 0,03$ )Combustible d'étude B ( $\omega = 0,05 \pm 0,03$ )

Les interconnexions des pores ne sont pas prises en compte dans la représentation actuelle du réseau de porosités comme un ensemble d'ellipses.

Cela se traduit par de fortes variations du rapport d'aspect pour représenter au mieux le réseau.

Résultats de la caractérisation du rapport de forme des ellipses représentant les porosités lenticulaires ⇒ Données d'entrée du modèle développé

## Perspectives

- Caractérisation par traitement d'images de l'orientation locale des pores lenticulaires
- Détermination du caractère interconnecté du réseau 3D pouvant participer à l'écart entre le modèle développé (ne prenant pas en compte ce paramètre) et les points expérimentaux
- Caractérisations expérimentales complémentaires de la microstructure (microtomographie, MEB, MEB-FIB, ...)
- Développement d'une approche en champs complets (FFT)
- Elargissement du domaine des mesures expérimentales utilisées pour la validation des modèles développés

## Références

- S. Torquato, "Random Heterogeneous Materials : Microstructure and Macroscopic Properties", Interdisciplinary Applied Mathematics, 16, Springer-Verlag, New York, 1<sup>ère</sup> édition, 2002.
- W. Burger et M. J. Burge, "Digital Image Processing : An Algorithmic Introduction Using Java", Texts in Computer Science, Springer-Verlag, London, 1<sup>ère</sup> édition, 2008.