



HAL
open science

Étude du comportement mécanique de microstructures à porosité bimodale pressurisée par transformées de Fourier rapides

Guylaine Boittin, Hervé Moulinec, Mihail Garajeu, Pierre-Guy Vincent

► **To cite this version:**

Guylaine Boittin, Hervé Moulinec, Mihail Garajeu, Pierre-Guy Vincent. Étude du comportement mécanique de microstructures à porosité bimodale pressurisée par transformées de Fourier rapides. Deuxièmes Journées Matériaux Numériques, Feb 2015, St-Aignan-sur-Cher, France. hal-01399879

HAL Id: hal-01399879

<https://hal.science/hal-01399879v1>

Submitted on 21 Nov 2016

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.

Étude du comportement mécanique de microstructures à porosité bimodale pressurisée par transformées de Fourier rapides

Guylaine Boittin¹, Hervé Moulinec¹, Mihai Garajeu², Pierre-Guy Vincent³

boittin@lma.cnrs-mrs.fr

¹ CNRS LMA

² CNRS L2P2

³ Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

Le comportement des matériaux poreux est étudié depuis longtemps car la présence des cavités peut mener à l'endommagement voire à la rupture du matériau. Des développements récents tendent à préciser l'effet de taille, de répartition ou de forme de ces pores sur le comportement élasto-plastique [1,2,3]. Le présent travail concerne l'effet d'une répartition bimodale de porosités sous pression : une porosité intragranulaire sphérique de petite taille et une porosité intergranulaire non-sphérique de grande taille (Figure 1). Ce type de microstructure est caractéristique du combustible nucléaire UO₂ irradié dont les pores contiennent des gaz de fission créés lors de l'irradiation (Figure 1a).

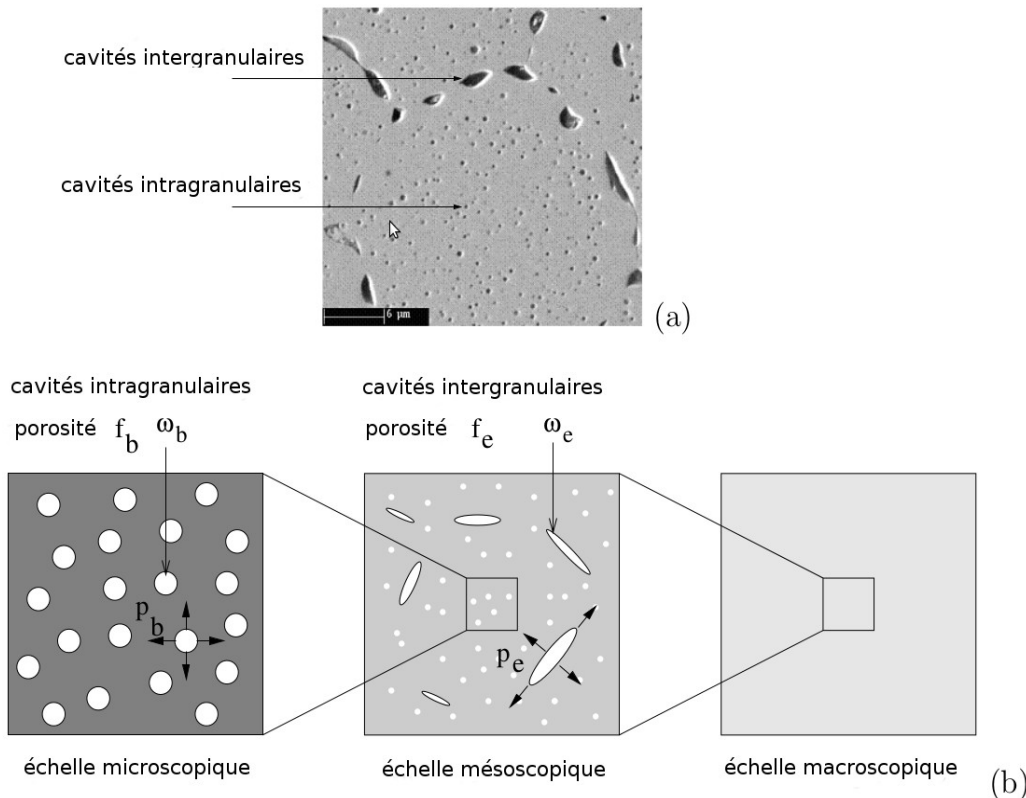


Figure 1 : (a) Micrographie UO₂ irradié (23 GW j/tU) après traitement thermique à 2000 K pendant 3 h [4], (b) Les trois échelles de la microstructure du combustible [1].

La porosité intragranulaire est prise en compte par un modèle de Gurson ou par un modèle GTN [7,8,9] avec une porosité qui évolue avec la déformation plastique. Elle n'est donc pas représentée explicitement dans description géométrique de la microstructure, mais est modélisée via la variable interne "porosité" f_b dans le modèle de comportement du matériau. La surface de plasticité est décrite par l'équation (1) (modèle GTN) avec prise en compte de la pression dans les bulles intragranulaires [1] :

$$q_3 \left(\frac{\Sigma_{eq}}{\sigma_0} \right)^2 + 2q_1 f_b \cosh \left(\frac{3 \Sigma_m + p_b}{2 \sigma_0} \right) - 1 - (q_1 f_b)^2 = 0. \quad (1)$$

L'évolution de la porosité est décrite par l'équation suivante : $\dot{f}_b = (1 - f_b) Tr(\dot{\epsilon}_p)$.

La porosité intergranulaire, par contre, est représentée explicitement sur la description géométrique de la microstructure.

Les simulations numériques ont été réalisées en utilisant le programme CraFT qui permet le calcul par transformées de Fourier rapides de la réponse mécanique macroscopique d'un matériau hétérogène périodique [5,6]. Il est parfaitement adapté à la modélisation de cette répartition bimodale de porosité et de son effet macroscopique.

Une première étape a consisté à implémenter dans CraFT le modèle GTN puis à le valider. Cela a été réalisé par comparaison avec les résultats analytiques obtenus par Garajeu et al. [10] sur une microstructure équivalente.

Une seconde étape a permis d'utiliser des algorithmes pertinents tant pour la génération du polycristal que pour la forme des bulles. Pour le polycristal, un modèle classique de Johnson Mehl est utilisé. Pour les bulles intergranulaires, un tirage aléatoire d'un nombre donné de pixels sur les joints et les points triples, associé à un algorithme de croissance prenant en compte les joints de grains permet une représentation des bulles intergranulaires qui ne sont donc pas de forme purement ellipsoïdale mais ont des formes plus complexes, notamment aux points triples (Figure 2). Actuellement, tous les grains sont modélisés par un comportement isotrope de type GTN. La caractéristique polycristalline sert uniquement lors de la génération de la microstructure poreuse. Une perspective serait d'utiliser un comportement mécanique cristallin pour les grains.

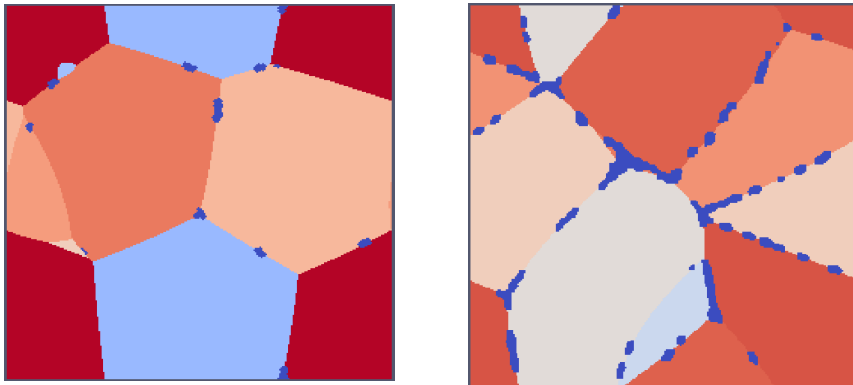


Figure 2 : Coupes de deux images de microstructures 3D représentant un polycristal contenant soit une faible soit une forte quantité de bulles intergranulaires (en bleu foncé). La matrice contenant les cavités est supposée suivre un comportement isotrope GTN (eq 1). Les cavités sont sous pression.

Les résultats montrent, suivant le taux de triaxialité (σ_m/σ_{eq}), une localisation de la plasticité entre les bulles intergranulaires presque le long des joints de grains. La déformation plastique locale dans le matériau engendre une évolution locale de la porosité intragranulaire f_b du modèle de comportement mécanique GTN. Cet effet peut se poursuivre jusqu'à former une zone continue où la porosité f_b est importante entre les bulles intergranulaires. Ce phénomène pourrait probablement se poursuivre jusqu'à rupture ductile au niveau des joints de grains.

Ce travail a permis, d'une part de valider l'utilisation de la méthode FFT pour des microstructures complexes avec le modèle GTN et un schéma accéléré (Lagrangien augmenté) et, d'autre part, de montrer l'effet d'une répartition bimodale intra/inter-granulaire de bulles pressurisées sur les joints de grains. Il permettra de mieux comprendre les phénomènes complexes qui se produisent dans le combustible nucléaire.

[1] P.-G. Vincent, Y. Monerie et P. Suquet, 2009a. Porous materials with two populations of voids under internal pressure. I: Instantaneous constitutive relations, *Int. J. Solids Struct.* 46, 480–506

[2] J. Julien, M. Garajeu et J.C. Michel, 2011. A semi-analytical model for the behavior of saturated viscoplastic materials containing two populations of voids of different sizes. *International Journal of Solids and Structures* 48, 1485–1498.

[3] P.-G. Vincent, P. Suquet, Y. Monerie et H. Moulinec, Effective flow surface of porous materials with two populations of voids under internal pressure: I. a GTN model, *Int. J. Plast.*, 2013

[4] Dubourg, R., Faure-Geors, H., Nicaise, G., Barrachin, M., 2005. Fission product release in the first two PHEBUS tests FPT0 and FPT1. *Nuclear Engineering and Design* 235, 2183–2208.

[5] H. Moulinec et P. Suquet, 1998. A numerical method for computing the overall response of nonlinear composites with complex microstructure. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 157, 69–94.

[6] H. Moulinec et F. Silva, Comparison of three accelerated FFT-based schemes for computing the mechanical response of composite materials, *Int. J. Numer. Meth. Engng* (2014)

[7] A. Gurson, 1977. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I - Yield criteria and flow rules for porous ductile media. *Journal of Engineering Materials and Technology* 99, 1–15.

[8] J. Koplik et A. Needleman, 1988. Void growth and coalescence in porous plastic solids. *International Journal of Solids and Structures* 24, 835–853.

[9] V. Tvergaard(1990) Material failure by void growth to coalescence. *Adv. Appl. Mech.* 27, 83-151.

[10] M. Garajeu, J.C. Michel et P. Suquet, A micromechanical approach of damage in viscoplastic materials by evolution in size, shape and distribution of voids, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 183 (2000) 223±246