

## EFFET DE LA POROSITE SUR LES PROPRIETES MECANIQUES ET LA TAILLE DU VER POUR UN MATERIAU POREUX

Hanane ELMINOR<sup>1</sup>

Sara EL MARZOUKI<sup>2</sup>

Hassan ELMINOR<sup>2</sup>

El mokhtar HILALI<sup>2</sup>

Oumaima ZEBRI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Equipe de recherche MEER, Matériaux, Environnement et Energies Renouvelables,  
Polytechnique Agadir, Universiapolis MAROC

<sup>2</sup>Equipe Matériaux, Mécanique et Génie Civil (E2MGC), ENSA AGADIR, MAROC

### RESUME :

Cette étude présente une approche numérique-statistique [1] pour prédire les propriétés élastique des matériaux poreux, à porosité moyenne, de type lotus par homogénéisation numérique. Les pores sont unidirectionnels de forme cylindrique et les microstructures 3D sont générées aléatoirement. La modélisation numérique est effectuée en utilisant la méthode des éléments finis en appliquant des conditions aux limites périodiques au VER. Des paramètres statistiques sont introduits pour l'étude de la représentativité du VER utilisé. Ces paramètres, comprenant la variance et la portée intégrale, aident à établir une relation entre le VER, le nombre de réalisations nécessaires pour le calcul et l'erreur relative. Les résultats obtenus, compatibles avec les résultats expérimentaux d'Ichitsubo et al. [2], affirment l'utilisation de cette méthode pour les matériaux poreux.

# 1. INTRODUCTION

Un nouveau type de métaux poreux dont les pores cylindriques longs sont alignés dans une direction a été fabriqué par solidification unidirectionnelle sous un atmosphère d'hydrogène ou d'azote gazeux sous pression. Ces métaux poreux ont été étudiés par **Ichitsubo et al** [2] en effectuant des simulations par éléments finis pour trois modèles de calcul avec des structures régulières et une avec une structure irrégulière (une reconstruction d'une véritable microstructure) de type de lotus Fer. Pour tous ces modèles de calcul, les pores sont unidirectionnels. En comparant les résultats numériques avec les résultats expérimentaux, ils ont montré que la topologie des pores influence considérablement la réponse du métal poreux.

Ce travail présente une méthode pour prédire les propriétés élastiques effectives de métaux poreux (de type lotus) par homogénéisation. Cette approche est largement utilisée dans l'analyse multi-échelles de matériaux poreux [3]. A cet effet, le VER doit être correctement défini. Par conséquent, étant bien défini et adapté à deux phases linéaires des matériaux hétérogènes élastiques, la méthode proposée par **Kanit et al.** [6,7], **ElMoumen et al.**[3, 4, 5] a été utilisé avec des simulations numériques par éléments finis pour déterminer la taille de VER.

Pour valider le modèle les résultats expérimentaux d'**Ichitsubo et al.(2002)** [2] sur un matériau poreux type cuivre ont été utilisés. Les propriétés élastiques du type de lotus en cuivre avec une porosité moyenne de 31% sont étudiées. Sa microstructure est proposée par [2], et on constate que le rapport des dimensions des pores est de l'ordre de 10-100.

La microstructure utilisée pour générer la géométrie VERS est donnée par le tableau (II.1) représentant les différents diamètres des VERs utilisés selon Ichitsubo et al[2].

Tableau 1. Les paramètres microstructuraux utilisés pour la génération de la géométrie VER [2].

f (%)	D (μm)	D <sub>max</sub> (μm)	D <sub>mini</sub> (μm)
31	16.5	55	1.8

## 2. CALCUL NUMERIQUE

### 1. Génération de microstructure et discrétisation par éléments finis

Le positionnement relatif des pores est proposé avec une distance de répulsion a. Selon ces conditions, cinq volumes sont générés à n réalisations.

Tableau 2. Le nombre de réalisations pour chaque taille de VER.

VER	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>
N	250	200	150	120	100
Volume size (μm <sup>3</sup> )	123506	292755	571787	988048	1568984

La convergence des propriétés élastiques macroscopiques a été vérifiée après discrétisation du VERs par des éléments quadratiques.

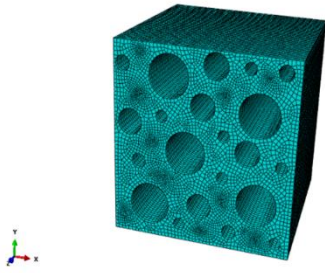


Figure 1. VER Maillé par éléments finis

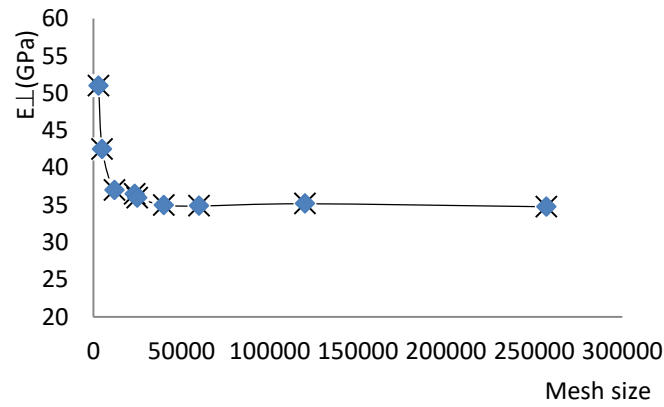


Figure 2. Effet de densité de maillage sur le module de Young

## 2. Conditions aux limites

Les PBC sont appliqués sur chaque bloc afin de déterminer les propriétés effectives macroscopiques et les propriétés morphologiques. La taille du volume augmente jusqu'à ce qu'on atteigne la convergence des propriétés macroscopiques. Les résultats obtenus par n réalisations sont utilisés pour l'identification des paramètres statistiques et la détermination de la taille du VER pour les matériaux poreux.

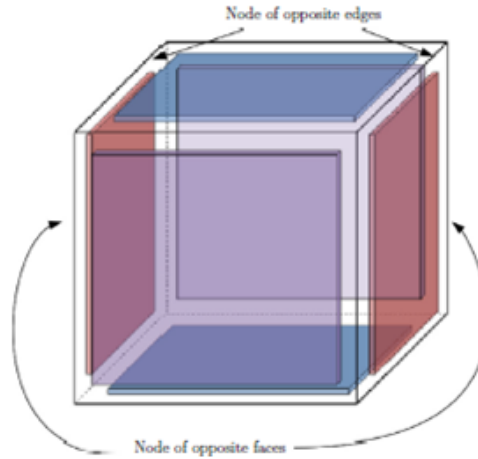


Figure 3. Conditions aux limites périodiques des lignes et des faces opposées.

## 3. Méthode statistique et VER

Elle est basé sur la variance  $D_Z^2(V)$  est donnée en fonction de la taille du volume  $V$  et d'autres propriétés de la microstructure comme suit :

$$D_Z^2(V) = f(1-f)(Z_1 - Z_2)^2 \left[ \frac{A}{V} \right] \quad (1)$$

d'où :  $D_Z^2(V)$  est la variance obtenue par un ensemble différent de n réalisations pour chaque taille de volume  $V$  et  $A$  est la portée intégrale de la fonction aléatoire  $Z$ .

Dans la pratique, la taille du VER est déterminée pour une erreur souhaitée :

$$\varepsilon_{abs} = \frac{2D_Z(V)}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Si le volume  $V$  est un VER la variance sera nulle.

### 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### 1. Calcul des propriétés élastiques

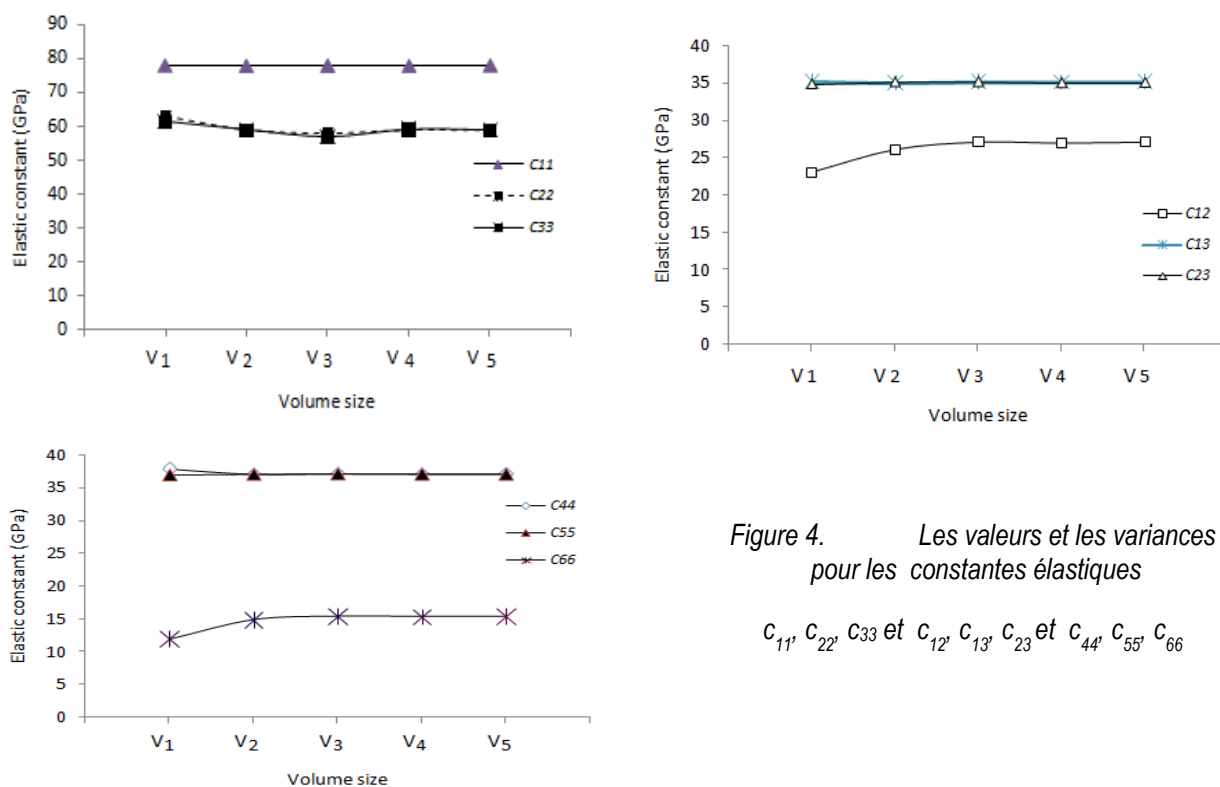


Figure 4. Les valeurs et les variances pour les constantes élastiques

$C_{11}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{33}$  et  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{23}$  et  $C_{44}$ ,  $C_{55}$ ,  $C_{66}$

#### 2. Homogénéisation numérique et statistique

La méthode de fittage, selon l'équation (II.6), entre la taille du volume  $V$  et la variance numérique  $D_z^2(V)$ , est utilisée pour identifier la portée intégrale  $A$  de notre matériau.

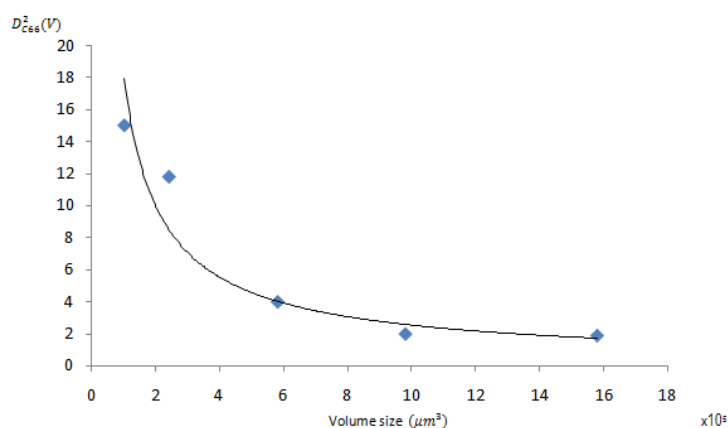


Figure 5. La variance de la constante élastique apparente  $C_{66}$ .

Les constantes élastiques effectives de matériaux poreux sont estimées avec les constantes moyennes apparentes élastiques pour 86 réalisations.

$$C_{app} = \begin{bmatrix} 58.44 & 27.46 & 35.02 & 0 & 0 & -0.22 \\ 27.46 & 58.77 & 36.5 & 0 & 0 & 0.02 \\ 35.02 & 35 & 78.11 & 0 & 0 & -0.08 \\ 0 & 0 & 0 & 37.20 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 37.05 & 0 \\ -0.22 & 0.02 & -0.08 & 0 & 0 & 15.22 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C_{exp} = \begin{bmatrix} 60 & 28 & 37 & 0 & 0 & 0 \\ 28 & 60 & 37 & 0 & 0 & 0 \\ 37 & 37 & 37 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 35 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 35 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 16 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Un très bon accord entre les simulations et les résultats expérimentaux.

## 4. CONCLUSION

La présente étude a démontré l'applicabilité de l'approche numérique-statistique pour les matériaux poreux pour un comportement élastiques (de type lotus). Les résultats indiquent que l'utilisation de petits VERS peut garantir des propriétés élastiques effectives et le comportement transversalement isotrope. Cependant, il est important pour la taille de VER ne pas être inférieure à une taille spécifique de volume, ce qui provoque l'introduction d'une grande erreur dans l'estimation des propriétés effectives.

La comparaison des résultats numériques combinés à des méthodes statistiques obtenus avec les résultats expérimentaux, a montré que la géométrie micrométrique utilisée pour générer la géométrie de VER peut représenter convenablement le comportement élastique linéaire du type des matériaux poreux à porosité moyenne.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Kanit, T., Forest, S., Galliet, I., Mounoury, V. and Jeulin, D., "Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach", Int. J. Solids Struct., Vol. 40, pp. 3647-3679, 2003
- [2] Ichitsubo, T., Tane, M., Ogi, H., Hirao, M., Ikeda, T. and Nakajima, H., "Anisotropic elastic constants of lotus-type porous copper: Measurements and micromechanics modeling", Acta. Mater., Vol. 50, pp. 4105-4115, 2002
- [3] A. El Moumen, T. Kanit, A. Imad, H. El Minor, "Computational thermal conductivity in porous materials using homogenization techniques: Numerical and statistical approaches » Computational Materials Science 97 148–158.",(2015).
- [4] A. El Moumen, A. Imad, T. Kanit, E. Hilali, H. El Minor "A multiscale approach and microstructure design of the elastic composite behavior reinforced with natural particles" Composites: Part B., (2014).
- [5] Ahmed El Moumen, Toufik Kanit, Abdellatif Imad, Hassan El Minor « Effect of overlapping inclusions on effective elastic properties of composites » Mechanics Research Communications 53,24– 30!!,(2013).
- [6] Kanit, T., N'Guyen, F., Forest, S., Jeulin, D., Reed, M., Singleton, S., "Apparent and effective physical properties of heterogeneous materials : Representativity of samples of two materials from food industry. Comput. Meth. Appl. Mech. Engng. 195, 3960–3982. 7, 10, 40, 41, 59, 85, 158, 163", (2006).
- [7] KANIT T., FOREST S., GALLIET I., MOUNOURY V., JEULIN D. Determination of the size of the representative volume element for random composites : statistical and numerical approach. International Journal of Solids and Structures, vol. 40, p. 3647–3679, (2003).