



HAL
open science

Propriétés effectives d'un joint à base de vermiculite : apport des méthodes d'homogénéisation

Manuel Lagache, Soufiane Belhouideg

► **To cite this version:**

Manuel Lagache, Soufiane Belhouideg. Propriétés effectives d'un joint à base de vermiculite : apport des méthodes d'homogénéisation. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03422860

HAL Id: hal-03422860

<https://hal.science/hal-03422860v1>

Submitted on 9 Nov 2021

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.

Propriétés effectives d'un joint à base de vermiculite : apport des méthodes d'homogénéisation.

M. Lagache, S. Belhouideg.

Laboratoire SYMME Domaine Universitaire, BP 80439 F74944 Annecy le Vieux Cedex

Résumé :

L'objectif est dimensionner un joint d'étanchéité à base de vermiculite. En effet, pour des applications d'étanchéité à haute température et pression élevée, des matériaux tel que la vermiculite sont des candidats prometteurs pour le remplacement de l'amiant. En raison des chargements thermomécaniques que subit un joint, il s'avère indispensable de déterminer les propriétés mécaniques de ce milieu. Une démarche est proposée pour évaluer les propriétés poroélastiques d'un matériau poreux. La définition du volume élémentaire représentatif (VER) est basée sur analyse de clichés réalisés au microscope électronique à balayage (MEB). De plus, une approche du type de Mori-Tanaka, avec un processus itératif, est utilisé en raison des particularités du matériau poreux étudié : Porosités ellipsoïdales, matrice isotrope transverse et taux de porosité de l'ordre de 30%.

Abstract :

The goal is to design a gasket made with vermiculite. Indeed, for high temperature and high pressures applications, materials such as vermiculite are interesting materials to substitute asbestos. Because of the thermo-mechanical loadings applied to gasket, it is fundamental to determine the mechanical properties of such medium. An approach is proposed in order to evaluate the poroelastic properties of a porous material. The definition of representative elementary volume (VER) is based on scanning electron microscopy (SEM) analysis. Moreover, an approach based on Mori-Tanaka technique, with an iterative process, is proposed because of the specific feature of studied porous material: Ellipsoidal porosities, transversely isotropic matrix and volume porosity ratio about 30%.

Mots clefs : Vermiculite, homogénéisation, porosité, poroélasticité, joint d'étanchéité.

1 Introduction

La vermiculite apparaît comme un candidat prometteur comme substitut à l'amiant. En effet, en raison de sa stabilité chimique et thermique de nombreuse application comme l'étanchéité pour des températures élevées et de fortes pressions sont envisageables [1]. La vermiculite possède une structure argileuse constituée par l'empilement de deux type de feuillets. De plus, elle possède des propriétés d'expansion sous l'effet de la chaleur (exfoliation). Par compactage de vermiculite exfoliée, il résulte un matériau poreux de très faible perméabilité. Cependant, la substitution de l'amiant par la vermiculite pour des joints d'étanchéité nécessite une caractérisation complète de son comportement poro-thermo-élastoplastique. En effet, le dimensionnement d'un joint nécessite une connaissance précise des propriétés du matériau. Par exemple la reprise élastique d'un joint est essentielle pour assurer l'étanchéité. Cependant, une caractérisation expérimentale exhaustive n'est pas envisageable. De plus dans une démarche d'optimisation de la microstructure pour une amélioration des propriétés macroscopiques, il s'avère indispensable d'utiliser des outils de prévision du comportement macroscopique. Cette démarche est classiquement basée sur des outils d'homogénéisation. Dans un premier chapitre, après un bref rappel des lois de comportement poroélastique, les principes fondamentaux de l'homogénéisation et plus particulièrement de l'approche de Mori-Tanaka [2] sont présentés. Ensuite, une présentation d'un processus itératif de cette technique d'homogénéisation est proposée. Ce processus itératif a pour but d'améliorer la prévision du comportement macroscopique pour des taux de porosité non négligeable, supérieurs 30%. Dans un deuxième chapitre, après une analyse de la convergence du processus itératif, des études paramétriques permettent de mettre en évidence l'influence de

paramètres de la microstructure (rapport de forme, orientation des porosités...) sur le comportement macroscopique.

2 Prédiction des propriétés poroélastiques.

L'étude du comportement mécanique des milieux poreux a été véritablement formalisée à partir des années 1930 par les travaux de Terzaghi. Des développements ont ensuite été apportés par Biot [3] avec une première formulation générale du comportement réversible des milieux poreux. La théorie de Biot suppose que le milieu est constitué de deux phases : une phase solide (matrice) et une phase poreuse saturée par un fluide (figure 1). Le comportement global du matériau dépend du comportement de chaque phase, de la pression du fluide interstitiel et des échanges ou des non échanges avec l'extérieur. Il y a deux cas : a) le cas drainé (échanges avec le milieu extérieur). La pression reste constante à l'intérieur du milieu poreux. b) Le cas non drainé. Il n'y a pas d'échanges avec le milieu extérieur, d'où la création des surpressions à l'intérieur du milieu poreux. L'apport de masse fluide est nul. La loi de comportement poroélastique linéaire s'écrit explicitement sous la forme suivante [4] [5] :

$$\begin{cases} \underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{C}} : \underline{\underline{\varepsilon}} - M \underline{\underline{B}} \frac{m}{\rho_0^f} & \text{(cas non drainé)} \\ \underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{C}}_0 : \underline{\underline{\varepsilon}} - \underline{\underline{B}} p & \text{(cas drainé)} \end{cases} \quad (1)$$

$\underline{\underline{\sigma}}$: Tenseur des contraintes, $\underline{\underline{C}}$: Tenseur des modules d'élasticité non drainés, $\underline{\underline{C}}_0$: Tenseur des modules d'élasticité drainés, $\underline{\underline{\varepsilon}}$: Tenseur des déformations, M : le module de Biot, $\underline{\underline{B}}$: Coefficient tensoriel de Biot, m : l'apport de masse fluide par unité de volume initial, p : la pression interstitielle et ρ_0^f : la masse volumique du fluide à l'état initial.

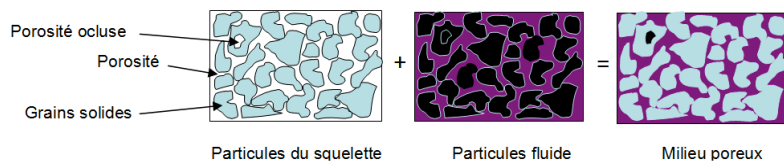


FIG. 1 –Modélisation d'un milieu poreux.

2.1 Détermination de la microstructure des joints à base de vermiculite

Notre sujet d'étude comporte trois principales spécificités : a) La vermiculite, squelette de notre matériau poreux, est anisotrope et peut être considéré comme isotrope transverse. En effet, cette matrice résulte de la compression d'empilements de feuillets de vermiculite. En raison de l'orientation privilégiée de ces feuillets perpendiculairement à l'axe de compression, l'hypothèse d'isotropie transverse apparaît justifiée (voir figure 2). La démarche micromécanique est mise en œuvre dans le but d'évaluer l'influence de la morphologie de l'espace poreux sur le degré d'anisotropie macroscopique du matériau.

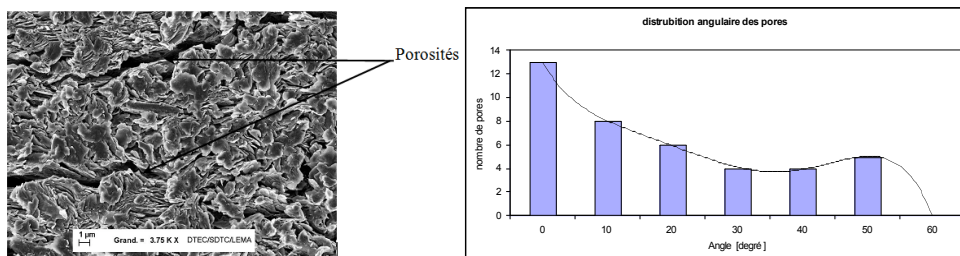


FIG. 2 – Cliché MEB d'un joint à base de vermiculite et distribution des pores.

2.2 Schéma de Mori Tanaka pour des inclusions ellipsoïdales : Rappels

La détermination des propriétés mécaniques effectives d'un matériau hétérogène passe par le choix d'un schéma d'homogénéisation. Parmi les méthodes d'homogénéisation utilisées celle proposée en 1973 par Mori et Tanaka [2] a été retenue dans notre étude. Le principe de ce schéma est de considérer l'hétérogénéité ellipsoïdale (la porosité) immergée dans la matrice infinie et soumise à un chargement mécanique ou

thermique suivant les grandeurs macroscopiques recherchées. Pour un milieu biphasé, le tenseur de rigidité homogénéisé en utilisant la méthode de Mori-Tanaka est donné par la relation ci-dessus :

$$C_{MT} = C_1 + f_2 \left[f_1 P + (C_2 - C_1)^{-1} \right]^{-1} \quad (2)$$

C_{MT} : tenseur de rigidité homogénéisé, C_1 : tenseur de rigidité de la phase 1, C_2 : tenseur de rigidité de la phase 2, f_1 : fraction volumique de la phase 1, f_2 : fraction volumique de la phase 2 et P : tenseur de polarisation de Hill. Dans le cas d'un matériau isotrope transverse avec des hétérogénéités ellipsoïdales, Withers [6] a déterminé analytiquement les composantes du tenseur de polarisation, qui dépendent uniquement des composantes du tenseur de rigidité de la matrice ainsi que de la forme et de l'orientation de l'ellipsoïde. Nous renvoyons à l'article [4] pour plus de détail sur l'expression de ce tenseur de polarisation.

2.3 Processus itératif

Le processus itératif d'homogénéisation repose sur la construction du matériau homogénéisé par ajouts successifs d'hétérogénéités. Ainsi, l'obtention d'un volume Y du milieu hétérogène de fraction ϕ d'hétérogénéité se fait par la construction successive de n milieux intermédiaires obtenus par ajouts d'une fraction d'hétérogénéités $\Delta\phi$ au matériau homogène de l'étape précédente jusqu'à atteindre la fraction finale ϕ suivant le schéma présenté sur la Figure 3. Dans le cas présent, les hétérogénéités sont des porosités noyées dans une matrice constituée de feuillets de vermiculite. À chaque étape, la technique d'homogénéisation utilisée est basée sur l'approximation de Mori Tanaka précédemment rappelé.

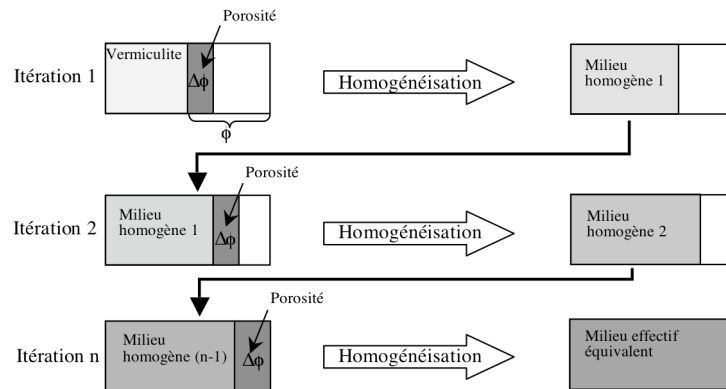


FIG. 3 – Principe du schéma itératif.

3 Résultats et Discussion.

3.1 Influence du processus itératif

Afin de valider le processus itératif pour le schéma de Mori-Tanaka, une étude paramétrique de l'influence du nombre d'itération est proposée. Le matériau étudié est du type argile poreuse avec des porosités sphériques (Cf. Fig. 4). Les propriétés mécaniques de la matrice isotrope transverse sont présentées dans le tableau 1. Aussi le milieu homogénéisé reste isotrope transverse car les porosités sont sphériques, le plan d'isotropie est inchangé.

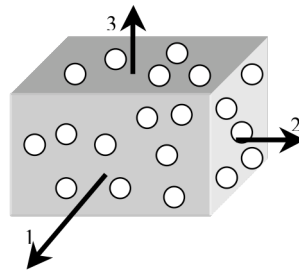


FIG. 4 – Modélisation du matériau étudié.

Les propriétés macroscopiques élastiques obtenues en faisant varier le taux de porosité de 0 à 100% sont résumées sur la figure 5. Les résultats sont représentés pour un nombre n d'itération : $n=1$ (schéma direct), 100 et 200. On constate que le schéma d'homogénéisation a généralement tendance à surestimer les propriétés macroscopiques. Ainsi, pour un taux de porosité de l'ordre de 30%, les modules d'élasticité E_1 , G_{13} et E_3

obtenus par le schéma direct sont respectivement de l'ordre de 24%, 26% et 42% plus élevés que ceux calculés par le processus itératif. De plus on constate que le processus itératif converge très rapidement. Dès 100 itérations, les valeurs obtenues sont très proches des limites de convergence. On souligne l'intérêt du processus itératif pour des matériaux dont le taux de porosité est non négligeable. Cette démarche permet de prendre en compte, de façon indirecte, l'interaction entre les porosités, ou les inclusions dans le cas d'un matériaux hétérogène tel qu'un composite. Nous avons vérifié que différents schémas d'homogénéisation fournissent des grandeurs homogénéisées semblables lorsque le processus itératif est appliqué. De plus, certaines méthodes d'homogénéisation, tel que le schéma auto-cohérent [7], fournissant des valeurs macroscopiques erronées pour des taux de porosité supérieures à 30% (valeurs excessivement faibles, voire négatives), donnent des valeurs homogénéisées semblables aux autres schémas d'homogénéisation grâce aux calculs itératifs. Dans la suite de cette étude, le processus itératif avec 100 itérations est utilisé.

Matériau étudié	$E_1 = E_2$ [MPa]	E_3 [MPa]	G_{13} [MPa]	$\nu_{12} = \nu_{31}$
Argile	2	10	1	0,25

Tab. 1 – Propriétés élastiques de la matrice.

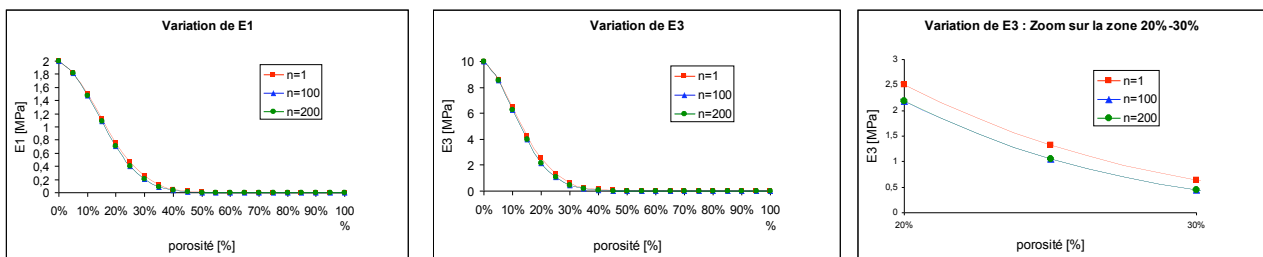


FIG. 5 – Influence du nombre d'itération sur les propriétés homogénéisées.

3.2 Influence du rapport de forme des porosités ellipsoïdales

Afin d'étudier l'influence de la microstructure du réseau poral, deux paramètres sont analysés dans cet article. Tout d'abord, le rôle du facteur de forme de la porosité ellipsoïdale sur les propriétés élastiques macroscopiques est étudié. Avec le processus itératif précédemment présenté, les propriétés élastiques d'un milieu poreux sont calculé en fonction du taux volumique de porosité et pour trois rapports d'élongement

(Cf Fig. 7) : $\xi = \frac{a_3}{a_1}$, $\zeta=0.1, 1$ et 10 avec ($a_1 = a_2$). Les ellipses sont toutes alignées entre elles et la matrice,

dont les caractéristiques sont mentionnées dans le tableau 1, est supposé isotrope transverse. Le milieu homogénéisé est, par conséquent, isotrope transverse. Les principaux résultats sont résumés sur la figure 6. Il est vérifié que le milieu poreux est isotrope transverse pour $\xi = 1$ (inclusion sphérique). Ces premiers résultats soulignent l'importance de la forme des porosités sur le comportement macroscopique du matériau poreux. Pour un taux de porosité 15%, les modules d'élasticité E_1 et E_3 varient respectivement de 66 % et 82% pour des rapports d'élongement $\xi = 1$ et $\xi = 10$

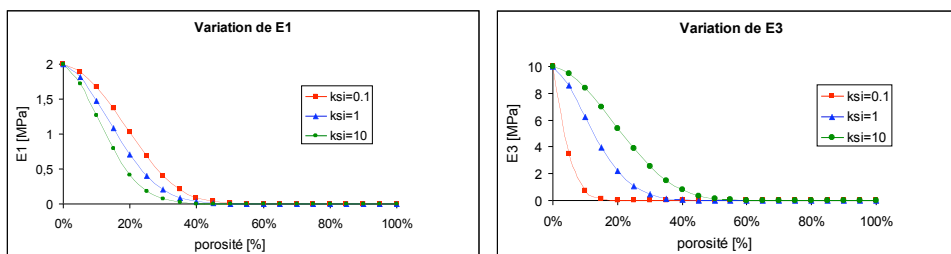


FIG. 6– Modules élastiques en fonction du taux de porosité et pour différents rapports de forme.

3.3 Influence de la distribution spatiale des porosités.

Les propriétés et l'anisotropie des poromatériaux sont fortement influencées par l'orientation des pores. Afin d'analyser l'influence de l'orientation des porosités ellipsoïdales, une démarche relativement simple est

proposée. On considère des familles de porosité avec une orientation pour chacune ces familles. Chaque famille est caractérisée par une orientation, définie par l'angle β (Cf. Fig.7) et par un pourcentage du taux de porosité total. Après l'obtention de la matrice de rigidité pour une famille, la prise en compte de l'orientation est obtenue par un changement de base. Ensuite le tenseur de rigidité macroscopique est obtenu par l'équation (3) :

$$C_{MT} = C_1 + \left[f_i \langle T \rangle^{-1} + (C_2 - C_1)^{-1} \right]^{-1} \quad (3)$$

Avec : $\langle T \rangle = \sum_{i=1}^N f_i \bar{T}_i$ et $T_i = \left[P_i + (C_i - C_1)^{-1} \right]^{-1}$: C_{MT} : tenseur de rigidité homogénéisé, C_1 : tenseur de rigidité de la phase i, f_i : fraction volumique de la phase i, P_i : tenseur de polarisation de Hill de la phase i. Pour tenir compte de la transformation des coordonnées locales de l'inclusion aux coordonnées globales du matériau hétérogène : $\bar{X}_{ijkl} = Q_{ip} Q_{jq} Q_{kr} Q_{ls} X_{pqrs}$

La matrice de changement de base Q est donnée par la formule (4) :

$$Q_i(\beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

Pour le matériau sujet de notre étude, les observations MEB mettent en évidence que les porosités résultent principalement de l'absence de plaquettes de vermiculite. Le matériau peut donc être schématisé par la juxtaposition d'amas de vermiculite dont les plaquettes et les porosités sont toutes orientées dans la même direction (Cf. Fig. 8). Chaque famille constitue donc un matériau anisotrope transverse, car l'axe de révolution des porosités est perpendiculaire au plan d'isotropie du squelette.

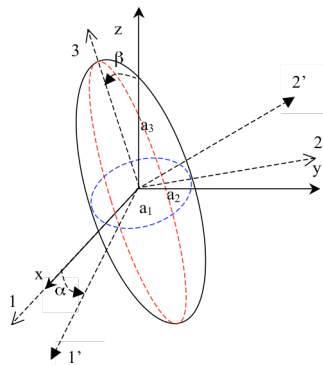


FIG. 7 – Représentation de la porosité ellipsoïdale

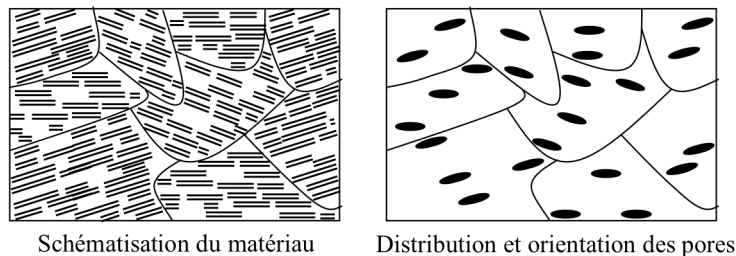


FIG. 8 – Représentation des joints à base de vermiculites.

Pour obtenir une première information sur l'influence de la distribution en orientation des porosités sur les propriétés macroscopiques du milieu poreux, deux cas sont analysés: a) Les ellipses sont toutes alignées, b) Les inclusions ellipsoïdales sont réparties suivant une distribution angulaire conforme avec celle mesurée sur nos échantillons et représentée la fig. 2 et résumée dans le tableau 2. Les résolutions sont réalisées pour

un milieu poreux ayant les caractéristiques suivantes : un facteur de forme $\xi = \frac{a_3}{a_1} = 10$ et les caractéristiques isotropes transverses du squelette sont mentionnées dans le tableau 1. Quelques résultats sont résumés sur la figure 8. On constate que les propriétés élastiques et l'anisotropie des poromatériaux sont fortement influencées par l'orientation des pores. Le tenseur homogénéisé est bien anisotrope dans le cas de la distribution réelle et isotrope transverse pour les porosités alignées. Pour un taux de porosité de l'ordre de 30%, le terme C_{33} de la matrice de rigidité de la distribution réelle diminue de 26 % par rapport au cas des ellipses alignées, tandis que le terme C_{44} de la matrice de rigidité de la distribution réelle augmente de 100% par rapport au cas des ellipses alignées.

Angle b (degré)	$\beta = \pm 5$	$\beta = \pm 15$	$\beta = \pm 25$	$\beta = \pm 35$	$\beta = \pm 45$	$\beta = \pm 55$
Fraction vol.	13. Φ /80	8. Φ /80	6. Φ /80	4. Φ /80	4. Φ /80	5. Φ /80

Tab. 2 – Distribution spatiale des porosités.

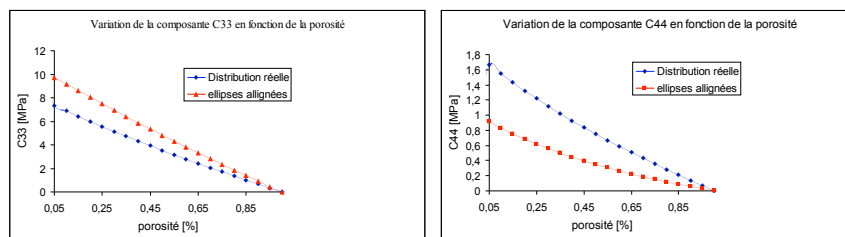


FIG. 8 – Termes de la matrice de rigidité pour les différentes distributions d'orientation.

4 Conclusion.

La démarche, présentée dans cet article, propose un outil pour l'évaluation des propriétés élastiques d'un milieu poreux avec des porosités ellipsoïdales en tenant compte de la microstructure (issue d'observation MEB, de micro tomographie...) pour des taux de porosité éventuellement importants. Il faut souligner qu'à l'échelle macroscopique, il est parfois très difficile de caractériser certains coefficients pomécaniques, tels que le coefficient de Biot et les coefficients de rigidité drainé pour les matériaux à faibles perméabilités. La démarche proposée est un outil pour estimer les caractéristiques indispensables au dimensionnement et l'optimisation d'un matériau poreux. L'un des difficultés est l'obtention des caractéristiques du squelette (sans porosité). Des techniques, telles que la micro indentation, peuvent fournir ces propriétés. Cependant, ce problème peut être considéré comme un problème inverse. C'est-à-dire que les propriétés macroscopiques peuvent être mesurées expérimentalement alors que les caractéristiques des constituants, ici la matrice, peuvent être évaluées numériquement. Les données macroscopiques ainsi que les caractéristiques de la microstructure deviennent alors les données d'entrée pour évaluer les propriétés des constituants du matériau poreux. Les perspectives, à courts termes, sont la confrontation de mesures expérimentales sur des matériaux à base de vermiculite (exfoliée et compactée) et les valeurs numériques obtenue par notre démarche d'homogénéisation.

References

- [1] Vermiculite gaskets to beat the heat, *Sealing Technology*, (1998) 55, 5.
- [2] Mori, T., and Tanaka, K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *ACTA Metallurgica* 21 (1973), 571-574.
- [3] Biot, M. A. General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of Ap. Physics* 12(1941), 155-164.
- [4] O. COUSSY ,1991, *Mécanique des milieux poreux*. Éditions Technip, Paris
- [5] L. Dormieux, A. Molinari, D. Kondo. Micromechanical approach to the behaviour of poroelastic materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 50 (2002) 2203 – 2231
- [6] Withers, P.J., 1989. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion in a transversely isotropic medium, and its relevance to composite materials. *Philos. Mag. A-59*, 759–781
- [7] R. Hill. A self-consistent mechanics of composite materials. *J.Mech. Phys.Solids*, 13 :213{222,1965).