



**HAL**  
open science

## Modélisation de comportement poroélastique d'un joint d'étanchéité à base de la vermiculite

Soufiane Belhouideg, Manuel Lagache

► **To cite this version:**

Soufiane Belhouideg, Manuel Lagache. Modélisation de comportement poroélastique d'un joint d'étanchéité à base de la vermiculite. MECAMAT 2011, Jan 2011, Aussois, France. hal-00585481

**HAL Id: hal-00585481**

**<https://hal.science/hal-00585481>**

Submitted on 13 Apr 2011

**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.

# MODELISATION DE COMPORTEMENT POROELASTIQUE D'UN JOINT D'ETANCHEITE A BASE DE LA VERMICULITE

S. Belhouideg, M. Lagache

Laboratoire SYstèmes et Matériaux pour la MEcatronique (SYMME), Université de Savoie

BP 80439, 74944 Annecy le Vieux Cedex.

Téléphone : 04 79 75 85 85 poste 78 21, Télécopie : 04 50 09 65 43

Soufiane.belhouideg@univ-savoie.fr, manuel.lagache@univ-savoie.fr

**Mots clés : milieux poreux, éléments finis, perméabilité, homogénéisation, vermiculite**

## 1. INTRODUCTION

L'objet de cette étude est l'analyse mécanique de joints d'étanchéité pour des applications sévères : pressions élevées (200 bars) et hautes températures d'utilisation (900°C). Ces joints de hautes performances doivent avoir une excellente tenue mécanique et de très faibles taux de fuite. L'un des matériaux pouvant remplir ce cahier des charges est l'amiante. Cependant, ce matériau est progressivement remplacé en raison de sa nocivité. Le dimensionnement d'un joint à base de vermiculite est proposé dans cet article. Pour cela, les propriétés physiques d'un joint à base de vermiculite sont évaluées numériquement. La démarche est basée sur l'utilisation des caractéristiques de la microstructure afin d'estimer les propriétés macroscopiques du joint (Dormieux et Bourgeois, 2002). Cette étude se scinde en deux parties : la première, relative à la mécanique des fluides, a pour objet de calculer la perméabilité du joint qui est directement liée au taux de fuite, caractéristique essentielle d'un joint d'étanchéité. Cette perméabilité est évaluée numériquement en utilisant un logiciel de calcul par élément finis (Ansys CFD). La seconde partie traite de la détermination des propriétés poroélastiques de la vermiculite, en se basant toujours sur sa microstructure. Ce travail s'appuie sur les techniques d'homogénéisation et plus particulièrement sur l'approche de Mori-Tanaka (Mori and Tanaka, 1973). Les propriétés élastiques ainsi que le module de Biot, qui traduit le couplage fluide-structure, de ce matériau anisotrope sont estimés en fonction des informations microscopiques (géométriques et mécaniques).

## 2. ÉTUDE ET MODELISATION DE LA MICROSTRUCTURE

Après une étape d'élaboration au sein du LCME, des joints ont subi des micrographies MEB afin d'en extraire les principales caractéristiques de la microstructure. Ce travail a été effectué par NGUYEN N.A., au sein du LCME.

Par une simple observation des clichés MEB, nous avons constaté que les joints de vermiculite sont constitués par un empilement de feuillet de vermiculite (Fig. 1). On note aussi que la porosité résulte essentiellement par des manques entre ces feuillets. Afin de simplifier cette microstructure, nous faisons l'hypothèse que le réseau de pores est constitué par une distribution aléatoire de pores de forme parallélépipédique. En utilisant un simple outil d'analyse d'image, nous avons évalué les dimensions moyennes d'un pore. Ce parallélépipède aplati a les dimensions suivantes : 900nm x 900nm x 80nm

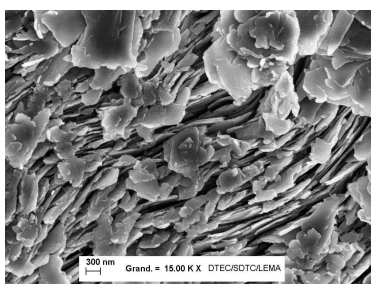


Figure 1. Cliché MEB d'un joint à base de vermiculite

### 3. CALCUL DE LA PERMEABILITE DES JOINTS A BASE DE VERMICULITE

La loi qui régit le comportement d'un matériau poreux vis à vis d'un fluide est la loi de Darcy :

$$\vec{u}_d = -\frac{k}{\mu} \text{grad}(P) \quad (1)$$

Où  $\vec{u}_d$  est la vitesse d'écoulement au sein du milieu poreux,  $k$ , la perméabilité et  $\mu$  la viscosité dynamique du fluide

Le taux de fuite, noté  $q$ , d'un joint est directement relié à la perméabilité du matériau constitutif. La relation reliant ces deux grandeurs est la suivante :  $q = \frac{RT}{V_m} \frac{A\Delta P}{\mu L} k$  (2)

Avec  $R$ , la constante des gaz parfaits,  $T$ , la température,  $V_m$ , le volume molaire,  $A$  et  $L$ , la surface de la face d'entrée du fluide et la longueur du matériau considéré et  $\Delta P$  le gradient de pression.

L'objectif est donc d'évaluer la perméabilité du matériau poreux en réalisant un calcul d'écoulement d'un fluide dans un réseau de pores représentatif de celui du matériau étudié (Liu J., Sano Y. et Nakayama A, 2009). Le cadre de cette étude peut être résumé de la façon suivante : On s'intéresse à des écoulements où le milieu poreux est saturé par un seul fluide. Pour l'application considérée, la vitesse du fluide est très faible et on peut supposer que l'écoulement est stationnaire (nombre de Reynolds faible devant l'unité).

Le réseau poral est construit grâce à une répartition aléatoire de pores parallélépipédiques (fig. 2-a,b,c). Une fois que le réseau de pores connectés atteint la valeur souhaitée (valeurs expérimentales), un maillage est réalisé avec les contraintes habituelles en mécanique des fluides. Une différence de pression est alors imposée entre la face d'entrée et celle de sortie. Des conditions de périodicité sont ensuite appliquées sur les autres faces et des vitesses nulles sont alors imposées sur l'ensemble des surfaces des pores (conditions de non-glissement à l'interface fluide-solide). Ces conditions sont résumées sur la figure 2-d. La résolution de ce problème est ensuite effectuée en utilisant le logiciel Ansys CFD (computational fluid dynamic).

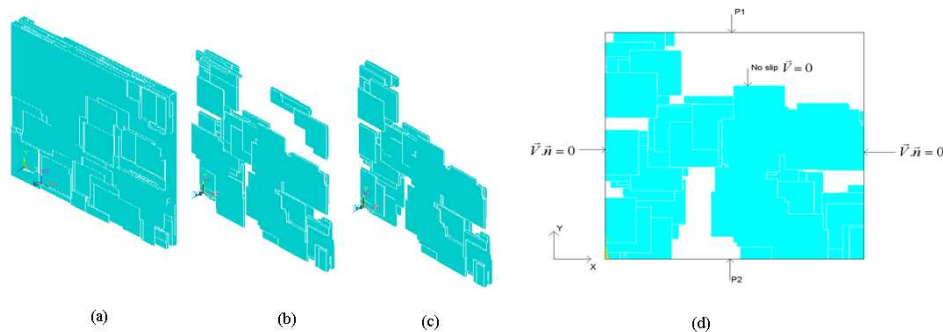


Figure 2. Construction du modèle 3D : (a) partie solide du VER (b) réseau des pores (c) pores connectés (d) conditions aux limites

Pour le calcul de la perméabilité, le fluide utilisé est l'air dont les caractéristiques sont rappelées dans le tableau 1. De plus les calculs sont réalisés avec les hypothèses classiques suivantes :

- l'écoulement du fluide est laminaire, permanent et isotherme
- l'air se comporte comme un gaz parfait
- les forces de volumes sont négligées
- le solide (squelette) est incompressible

Masse volumique [Kg.m <sup>-3</sup> ]	Viscosité dynamique [Pa.s]	Masse molaire [g.mol <sup>-1</sup> ]
1,29	1,87 e-5	28,965

Tableau 1. Caractéristique de l'air

Le tableau 2 résume les résultats obtenus pour une porosité de 22%.

La différence entre la perméabilité suivant x et celle suivant z s'explique par l'empilement des feuillets de vermiculite. En effet, lors de la préparation de l'échantillon, la poudre de la vermiculite est soumise à une pression axiale suivant l'axe Z, ce

qui engendre une orientation des feuillets suivant le plan XY. Dans notre modélisation, ceci se traduit par la définition d'un réseau poral résultants de l'empilement de parallélépipèdes aplatis.

Taux de porosité [%]	Perméabilité suivant x $k_x$ [m <sup>2</sup> ]	Perméabilité suivant z $K_z$ [m <sup>2</sup> ]
22	1,69E-17	1,79E-18

Tableau 2. Perméabilité dans les trois directions pour une porosité de 22%

#### 4. ÉVALUATION DES CARACTERISTIQUES POROELASTIQUES DES JOINTS A BASE DE VERMICULITE

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 été ensuite apportés par Biot 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. Le comportement global du matériau dépend du comportement de chaque phase, de la pression du fluide interstitielle et des échanges ou des non échanges avec l'extérieur (Coussy, 1995). Il y a deux cas : a) le cas drainé : il y a des 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 la masse fluide est nul.

La loi de comportement poroélastique pour un matériau isotrope s'écrit explicitement sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \underline{\sigma} = \left( K - \frac{2\mu}{3} \right) tr(\underline{\epsilon}) \underline{1} + 2\mu \underline{\epsilon} - b.M \frac{m}{\rho_0} \underline{1} \text{ (Non Drainé)} \\ \underline{\sigma} = \left( K_0 - \frac{2\mu}{3} \right) tr(\underline{\epsilon}) \underline{1} + 2\mu \underline{\epsilon} - b.(p - p_0) \underline{1} \text{ (Drainé)} \\ p = p_0 + M \left( -b.tr(\underline{\epsilon}) + \frac{m}{\rho_0} \right) \end{cases} \quad (3)$$

$K$  et  $K_0$ : Module de compression isotrope respectivement non drainé et drainé

$G$  : Module de cisaillement du solide

$M$  et  $b$ : Module et coefficient de Biot

$m$  : Densité volumique d'apport de masse fluide

$p$  et  $p_0$ : pression interstitielle du fluide et pression de référence

Avant de lancer un processus d'homogénéisation pour un matériau hétérogène donné, le choix d'un volume élémentaire représentatif (VER) reste une tâche très délicate, car ce VER doit contenir le maximum d'informations concernant le matériau en question et il doit répondre aux critères de séparation d'échelles. Les très nombreuses méthodes d'homogénéisation proposées dans la littérature diffèrent entre elles par le choix du VER, qui peut être plus ou moins riche et par la façon d'imposer le chargement macroscopique. Parmi les méthodes les plus utilisées, on cite la méthode de Mori-Tanaka (Mori and Tanaka, 1973), le schéma dilué, la borne de Hashin-Shtrikman, la méthode auto-cohérente...

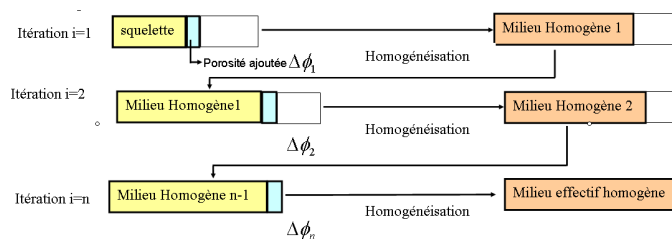


Figure 3. Schéma d'homogénéisation par processus itératif

Ces méthodes, dites classiques, ne sont valables que pour une porosité très faible, c'est pour cela que l'on peut homogénéiser de façon itérative. Cette démarche repose sur le fait d'introduire à chaque étape

d'itération un faible taux de porosité et d'utiliser l'une des méthodes classiques pour homogénéiser. Le processus s'arrête quand la porosité souhaitée est atteinte. L'obtention du milieu homogène final passe par la construction de  $n$  milieux intermédiaires obtenus par ajout d'un faible taux de porosité au matériau équivalent construit à l'étape précédente (Fig 3).

La figure 4 visualise un résultat représentatif de cette étude. Sur cette courbe visualisant l'évolution du module de Biot en fonction du taux de porosité suivant le schéma de Mori-Tanaka, nous constatons l'intérêt du processus itératif qui fournit une meilleure estimation du comportement du matériau macroscopique. En effet, pour de faibles porosités, les deux courbes sont confondues, mais lorsque la porosité augmente, les courbes diffèrent notablement.

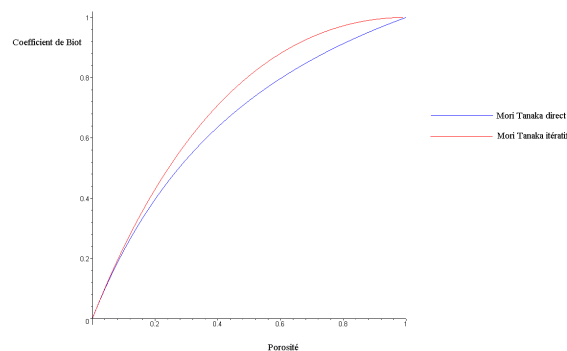


Figure 4. Variation du coefficient de Biot avec la porosité : approche de Mori-Tanaka directe et itérative

## 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Notre méthode d'évaluation numérique de la perméabilité a tout d'abord été validée par confrontation, dans des cas simples, avec des modèles analytiques comme celui de Carman-Kozeny, (Xu P. et Yu B, 2008) (Kaviany M, 1995). Ensuite, le taux de fuite d'un joint de vermiculite calculé en fonction de la micro-structure du réseau poral, a été confronté aux valeurs expérimentales. Ces premiers résultats sont encourageants, mais nécessitent des études paramétriques complémentaires. Le deuxième volet de notre étude, actuellement en cours, est l'évaluation du comportement poroélastique (module de compressibilité, module de Biot,...) de la vermiculite, en utilisant l'une des méthodes d'homogénéisation itérative. Ces deux aspects nous permettront d'étudier complètement le comportement global d'un joint en service. Notre objectif est donc de prévoir le comportement mécanique complet (thermo-poro-élasto-plastique) en fonction de la microstructure de la vermiculite.

## REFERENCES

- Mori T. and Tanaka K., "Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions", *Acta Metallurgica*, 21, (1973), pp. 571-574
- Coussy O., "Mécanique des milieux poreux", éditions Technip -Paris, (1995)
- Dormieux L. et Bourgeois E. "Introduction à la micromécanique des milieux poreux" - Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, (2002).
- Liu J., Sano Y. et Nakayama A., "A simple mathematical model for determining the equivalent permeability of fractured porous media", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36, (2009), pp. 220-224.
- Kaviany M., "Principles of Heat Transfer in Porous Media", Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, (1995).
- Xu P. et Yu B., "Developing a new form of permeability and Kozeny-Carman constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry", *Advances in Water Resources*, 31, (2008), pp. 74-81.