

Simulation numérique de l'influence de la porosité sur le comportement d'un alliage à mémoire de forme NiTi

Julien Troufflard, Gérard Rio, Yujie Liu

▶ **To cite this version:**

Julien Troufflard, Gérard Rio, Yujie Liu. Simulation numérique de l'influence de la porosité sur le comportement d'un alliage à mémoire de forme NiTi. 12e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2015, Giens, France. hal-01515078

HAL Id: hal-01515078
https://hal.science/hal-01515078

Submitted on 27 Apr 2017

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.

Public Domain

CSMA 2015
12e Colloque National en Calcul des Structures
18-22 Mai 2015, Presqu'île de Giens (Var)

Simulation numérique de l'influence de la porosité sur le comportement d'un alliage à mémoire de forme NiTi

J. Troufflard[1], G. Rio[1], Y. Liu[2]

[1] *LIMATB, Université de Bretagne Sud, {troufflard, gerard.rio}@univ-ubs.fr*
[2] *University of Western Australia, yinong.liu@uwa.edu.au*

Résumé — Ce travail propose une étude par éléments finis de l'évolution des propriétés d'un alliage à mémoire de forme à base Nickel-Titane en présence de porosité. Le but final est de remonter au comportement homogène équivalent. L'influence de la porosité est étudiée en réalisant des simulations avec des conditions périodiques en déplacement sur des motifs ayant une fraction de vide jusqu'à 20%. Le matériau est modélisé avec une loi d'élasto-hystérésis. L'évolution des propriétés macroscopiques est obtenue par une analyse graphique directe des moyennes des champs de contrainte et de déformation.
Mots clés — Alliage à mémoire de forme, milieu poreux, comportement homogène.

1 Introduction

Les nouvelles technologies permettent l'élaboration de matériaux architecturés à base d'alliage à mémoire de forme (AMF). Notamment, l'introduction d'une porosité permet de disposer d'un matériau plus léger. Les matériaux de type NiTi présentent également l'intérêt d'être bio-compatibles ce qui en font aujourd'hui des matériaux très utilisés dans le domaine médical. Néanmoins l'élaboration et l'étude d'AMF NiTi poreux posent de nombreux problèmes et font l'objet d'intenses recherches [2, 11, 4]. Dans ce contexte l'objectif du travail est l'étude prospective du comportement de matériaux poreux à base NiTi d'une manière analogue aux travaux récents [1]. L'originalité de l'étude est de s'appuyer sur une loi validée dans le cadre d'un comportement hétérogène de structure NiTi de mêmes types [7, 8].

Lors de ces travaux, un même type d'alliage a été étudié expérimentalement et numériquement dans le cas de structures planes perforées. Par extension, on se place maintenant à l'échelle mésoscopique en étudiant des motifs élémentaires par éléments finis dans lesquels on modélise la fraction de vide. Il s'agit d'un travail numérique dont le but est de dégager les tendances sur l'évolution des caractéristiques du matériau en fonction du taux de porosité. Le comportement homogène d'un motif est obtenu par une opération standard de moyenne des champs de déformation et de contrainte. Dans une première étape, le comportement hétérogène de la microstructure est simulé pour différents motifs permettant de balayer une diversité de structures. L'idée est de voir si des tendances peuvent se dégager. Dans une seconde étape, un comportement macroscopique homogène est identifié.

2 Matériau étudié et loi constitutive

Le type de matériau étudié est un AMF à base NiTi (Ti-50.8at% en état superélastique), caractérisé expérimentalement lors de précédents travaux [7]. L'étude utilise le modèle d'élastohystérésis développé initialement par l'équipe de Grenoble (Guélin, Pégon, Favier) [3], implanté dans le code universitaire Herezh++ développé à l'UBS. On pourra se reporter par exemple à [5, 6] pour une présentation synthétique du modèle et de ses paramètres.

Le modèle a été confronté avec des résultats expérimentaux dans le cas de champs de déformation hétérogènes, en particulier pour des plaques trouées [7, 8] en tension. Les résultats obtenus, globalement et localement, sont précis que ce soit pour des structures à trous circulaires ou carrés.

La figure (2), pour le cas d'une porosité nulle, présente le comportement du matériau solide en cisaillement. On notera en particulier l'existence classique d'un plateau de transformation.

3 Synthèse des simulations

Les motifs étudiés sont des plaques de dimension 30 x 30 x 0.6 mm. On considère d'une part des motifs avec des trous circulaires de même diamètre et positionnés aléatoirement et d'autre part, des motifs où l'on vient sélectionner aléatoirement des éléments vides sur un maillage régulier (voir figure 1). Huit géométries sont étudiées pour chacune des fractions de porosité suivantes : 2.5, 5, 7.5, 10, 15 et 20%. L'étude de covariance montre que les motifs à trous circulaires ne sont pas ergodiques, contrairement au second type de motifs.

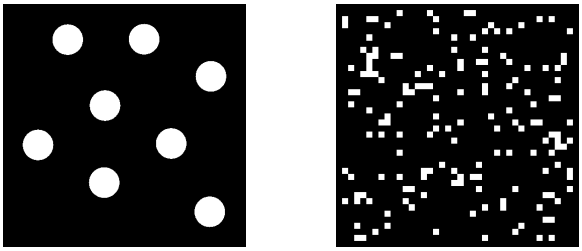


FIGURE 1 – Exemples de motifs pour une fraction de vide de 10%

Les maillages sont réalisés avec des éléments pentaèdres linéaires sous-intégrés : découpage triangulaire en surface et un élément dans l'épaisseur. On suppose un état de contraintes planes. La résolution du problème non-linéaire utilise une méthode classique de Newton-Raphson, le système linéaire étant résolu par la méthode de Cholesky via la bibliothèque Lapack parallélisée. Des conditions de périodicité en déplacement sont imposées dans les deux directions du plan de chargement pour les trois modes de sollicitation : cisaillement simple, traction et compression uniaxiales. La figure 2 montre un exemple de superposition de toutes les simulations, ici en cisaillement simple.

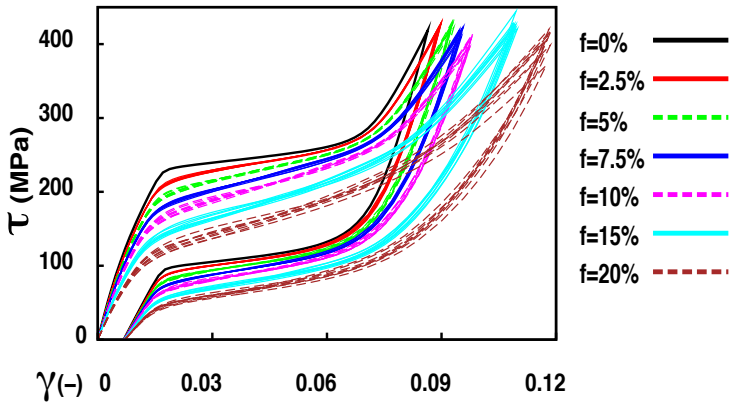


FIGURE 2 – Cisaillement simple : superposition de tous les motifs pour plusieurs fractions de porosité f

Malgré la variété des motifs, on observe une superposition remarquable des réponses pour un niveau de porosité donné. Nous observons donc une certaine indépendance du comportement macroscopique vis-à-vis d'une géométrie aléatoire malgré les différences de morphologie (variation du nombre de trous circulaires, présence éventuelle d'agrégats de formes variées, différences dans la distribution de la fraction de porosité).

L'augmentation de porosité permet d'atteindre une déformation macroscopique plus grande à niveau de contrainte comparable. La déformation inélastique résiduelle en fin de décharge reste la même pour tous les motifs et porosités. Le modèle prévoit donc une augmentation de la propriété de superélasticité de l'AMF en présence de porosité.

4 Comportement homogène équivalent

En première approche, on retient pour le comportement homogène équivalent du milieu poreux, une forme de même type que celui du matériau 100% dense à savoir un comportement d'élasto-hystérésis.

Les pentes et seuils caractéristiques du modèle sont schématisés sur la figure 3(a).

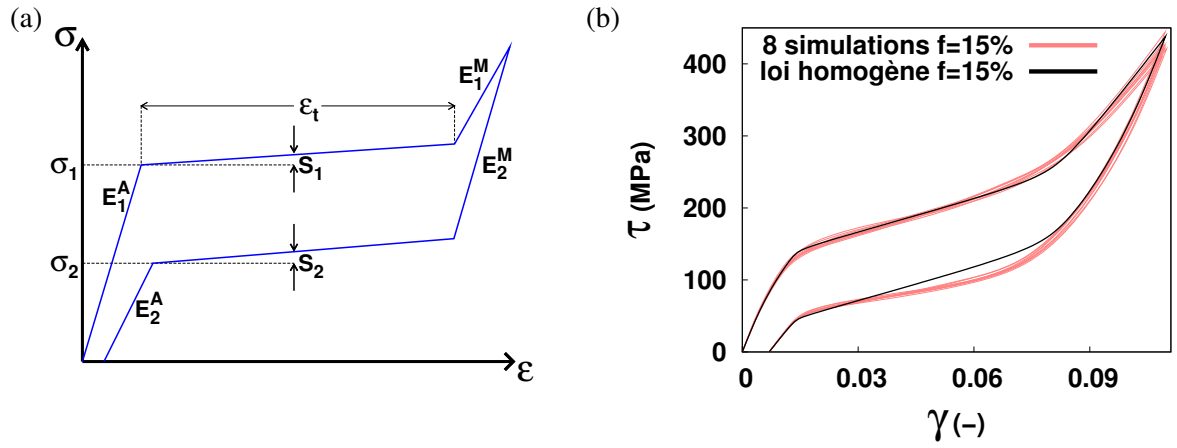


FIGURE 3 – (a) Représentation schématique du comportement, (b) comportement homogène f=15%

La partie déviatorique du modèle est complètement identifiable par analyse graphique de la réponse en cisaillement simple (cf. [5]). Cette propriété est utilisée pour remonter aisément au comportement homogène d'un motif poreux en traçant la moyenne de la contrainte de cisaillement en fonction de la moyenne du taux de cisaillement. Une seule simulation suffit pour remonter à tous les coefficients excepté le module de compressibilité linéaire dans notre cas. Celui-ci est alors obtenu via l'évolution des parties sphériques des contraintes et déformations.

L'évolution de la dépendance au trajet de déformation n'est pas directement identifiable mais sera étudiée au travers des trois modes de sollicitation : traction, compression, cisaillement.

D'une manière générale, les caractéristiques matériau diminuent quasi-linéairement avec l'augmentation du taux de porosité, à l'exception des pentes S_1 et S_2 et de la longueur du plateau ε_t. La figure 4 montre cette tendance pour quelques paramètres.

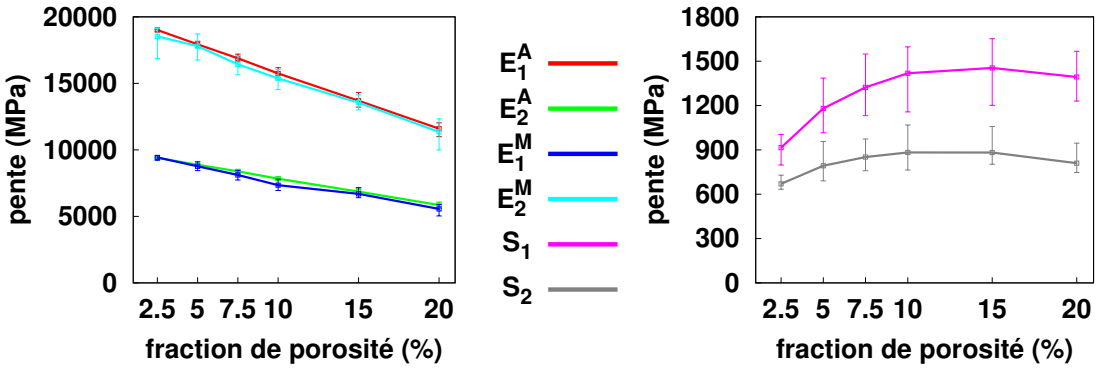


FIGURE 4 – Evolution des paramètres en fonction de la fraction de porosité

Les concentrations de contrainte en présence de porosité contribuent à activer plus rapidement la transformation austénite-martensite, ce qui abaisse la contrainte seuil macroscopique de début de transformation et augmente la pente de transformation. Mais au-delà de 15% de porosité, cet effet sature, voire diminue.

Comparaison entre loi homogène et simulation périodique La comparaison entre motifs simulés et loi de comportement homogène (figure 3(b)) montre qu'en première approche, le modèle initial avec des paramètres homogènes équivalents permet une bonne corrélation. Il est à signaler que lors d'un essai purement sphérique, le modèle ne rendra qu'un comportement linéaire alors que physiquement et numériquement sur motif, une hystérésis apparaît sur un cycle charge-décharge [1].

Dépendance au trajet de déformation Plusieurs paramètres du modèle dépendent du trajet de déformation. Par exemple, le seuil de la partie réversible du modèle, noté Q_s (cf. [5]), diminue en traction et augmente en compression. La prise en compte de cette évolution est décrite par la relation

$Q_s(\varphi) = Q_s(\varphi = \pi/6)/(1+\gamma\cos(3\varphi))^n$ où φ est l'angle de Lode ($\varphi = \pi/6$ en cisaillement) et $\gamma = 0.2$ et $n = 0.9$ sont des paramètres du modèle solide. La figure 5 montre que la simulation prévoit une évolution en fonction de la porosité, en compression différente de celle en traction. En traction, la moyenne simulée est en accord avec la valeur que l'on aurait obtenue théoriquement avec l'expression $Q_s(\varphi)$ du modèle solide. En compression, il y a une divergence entre simulation et l'évolution théorique.

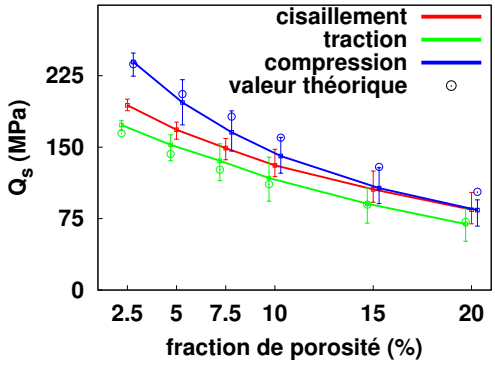


FIGURE 5 – Evolution du seuil

5 Conclusion

Dans ce travail, le comportement d'un alliage à mémoire de forme poreux a été étudié par éléments finis. Des simulations périodiques ont été utilisées comme outil pour analyser les tendances dans l'évolution du comportement. Jusqu'à 20% de porosité, la morphologie d'un motif aléatoire a peu d'influence sur son comportement homogène et seule la fraction de porosité agit sur l'évolution des paramètres matériau. La simulation prévoit que la partie réversible de la déformation, donc la propriété de superélasticité, augmente avec le taux de porosité. Une loi homogène de même forme que la loi locale permet une bonne corrélation.

Références

[1] M. J. Ashrafi, J. Arghavani, R. Naghdabadi, and S. Sohrabpour. *A 3-d constitutive model for pressure-dependent phase transformation of porous shape memory alloys.* JMBBM, 42(0) :292–310, 2 2015.

[2] A. Bansiddhi, T. Sargeant, S. Stupp, and D. Dunand. *Porous niti for bone implants : A review.* Acta biomaterialia, 4(4) :773–782, 2008.

[3] D.Favier, P. Guélin, P. Pégon. *Thermomechanics of hysteresis effects in shape memory alloys.* Materials Science Forum, 56-58 559-564, 1990

[4] S. Nemat-Nasser, Y. Su, W.-G. Guo, and J. Isaacs. *Experimental characterization and micromechanical modeling of superelastic response of a porous niti shape-memory alloy.* Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 53(10) :2320–2346, 10 2005.

[5] G.Rio, D.Favier, Y.Liu. *Elastohysteresis : un modèle 3d phénoménologique précis pour le comportement super élastique d'alliage à mémoire de forme sous chargements complexes.* In *19ème CFM*, pages 1–6, august 2009.

[6] G.Rio, D.Favier, Y.Liu. *Elastohysteresis model implemented in the finite element sofware herezh++.* In P. Sittner, L. Heller, and V. Paidar, editors, *ESOMAT 2009 The 8th European Symposium on Martensitic Transformations*, number 08005, DOI :10.1051/esomat/200908005. EDP Sciences (www.esomat.org), december 2009.

[7] G. Rio, C.Cellard, B. Shariat, Y. Liu, V. Grolleau, and D. Favier. *Étude numérique et expérimentale de plaques perforées en niti, chargées en tension.* In *21ème CFM Bordeaux*, pages 1–6, http ://www.cfm2013.org/, 2013.

[8] B.S. Shariat, Y.Liu, G.Rio. *Finite element computational modelling and experimental investigation of perforated niti plates under tension.* Materials Research Bulletin, 48(12) :5099–5104, 2013.

[9] B.S. Shariat, Y.Liu, G.Rio. *Numerical modelling of pseudoelastic behaviour of niti porous plates.* Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 25(12) :1445–1455,doi : 10.1177/1045389X13505783, 2014.

[10] B.S. Shariat, Y.Liu, G.Rio. *Pseudoelastic behaviour of perforated niti shape memory plates under tension.* Intermetallics, 50 :59–64, 2014.

[11] Y. Zhao, M. Taya, Y. Kang, and A. Kawasaki. *Compression behavior of porous niti shape memory alloy.* Acta Materialia, 53(2) :337–343, 1 2005.