

Identification de propriétés mécaniques élastiques locales volumiques de matériaux hétérogènes

L. PETUREAU^a, P. DOUMALIN^a, F. BREMAND^a

a. Institut Pprime UPR3346, ENSMA, CNRS, Université de Poitiers
louis.petureau@univ-poitiers.fr

Résumé :

Ces travaux présentent les intérêts de la méthode de recalage de modèle éléments finis dans le cadre de l'identification de propriétés mécaniques locales dans le volume d'un matériau fibreux. L'algorithme d'optimisation, à savoir un algorithme génétique parallélisé, couplé à un modèle éléments finis permet de minimiser une fonctionnelle quadratique en déformations. Les résultats expérimentaux permettent d'établir une relation au premier ordre entre la porosité locale et le module élastique local.

Abstract :

This work present the capabilities of the finite element model updating method in the aim of 3D local mechanical properties identification of a fibrous material. The optimization algorithm, a genetic algorithm in this case, coupled with a finite element model allows to minimize a quadratic functionnal in strains. Experimental results show a relation between local porosity and local elastic modulus.

Mots clefs : Recalage de Modèle Éléments Finis, matériau poreux, calcul parallèle

1 Introduction

La problématique de l'identification de paramètres mécaniques de loi de comportement est un enjeu majeur pour améliorer la compréhension du comportement des matériaux hétérogènes. Les hétérogénéités peuvent être dues aux constituants et/ou aux microstructures complexes qui caractérisent ces matériaux. C'est le cas du matériau qui fait l'objet de ces travaux, à savoir un composite à base de fibres de bois et de PES. Ces deux constituants et la porosité très élevée de ce matériau ($\approx 95\%$) lui confèrent une microstructure complexe tridimensionnelle, voir Fig. 1, qui limite fortement d'une part la possibilité de faire l'hypothèse de l'homogénéité du matériau et d'autre part la possibilité d'une étude en 2D. C'est pourquoi une étude tridimensionnelle a été menée. La loi de comportement choisie pour cette étude est l'élasticité linéaire isotrope. En première approche, cette loi paraît suffisante pour détecter une éventuelle relation entre les propriétés de la microstructure et les propriétés mécaniques. L'isotropie se justifie empiriquement par les champs mesurés qui n'indiquent pas de direction privilégiée dans le comportement du matériau. De la même manière, nous considérons le coefficient de Poisson constant et faible. Par conséquent, seuls les modules d'Young sont identifiés.

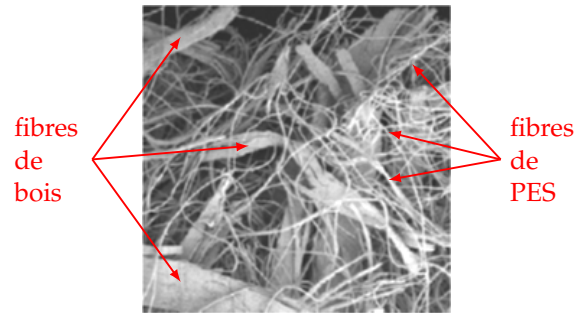


Fig. 1 – Microstructure du matériau fibreux avec les deux types de fibres

2 Démarche d'identification

Afin d'obtenir les propriétés recherchées, il faut construire un modèle éléments finis suffisamment représentatif du cas réel avec des conditions aux limites adaptées et également choisir un algorithme d'optimisation performant pour converger efficacement. La fonctionnelle à minimiser suppose la connaissance des champs mesurés, ce qui est possible avec la méthode de corrélation d'images numériques. Cette fonctionnelle s'écrit classiquement :

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{2} (\boldsymbol{\epsilon}^{mes} - \boldsymbol{\epsilon}(\boldsymbol{\theta}))^t (\boldsymbol{\epsilon}^{mes} - \boldsymbol{\epsilon}(\boldsymbol{\theta})) \quad (1)$$

Les déformations sont calculées au centre de chaque élément pour les champs mesurés et simulés.

3 Modèle éléments finis

Les équations classiques de la méthode des éléments finis ont été implémentées afin d'obtenir la réponse simulée du matériau. Les éléments choisis sont des éléments tridimensionnels de Lagrange de degré 1 à 8 nœuds. La matrice de rigidité élémentaire $[K^e]$ s'écrit :

$$[K^e] = \int_V [B]^t [D] [B] dV \quad (2)$$

Le vecteur d'effort élémentaire $\{F^e\}$ s'écrit :

$$\{F^e\} = \int_S [N]^t \{T\} dS \quad (3)$$

Le fait d'avoir choisi une loi de comportement linéaire conduit, après assemblage, à l'obtention d'un système linéaire à résoudre pour déterminer les champs de déplacements. La matrice de rigidité globale du système étant carrée, symétrique et creuse par construction, l'algorithme du gradient conjugué préconditionné a été privilégié.

Les conditions aux limites en déplacements sont telles que les déplacements mesurés sont imposés sur les nœuds de la surface inférieure du volume de mesure. Concernant les conditions aux limites en force, elles sont appliquées aux nœuds de la surface supérieure du volume de mesure de sorte que l'effort résultant soit égal à l'effort global mesuré.

4 Algorithme de minimisation

Un algorithme génétique [1] a été privilégié pour mener à bien la minimisation de la fonctionnelle (1). En effet, les méthodes basées sur les gradients se sont avérées inadaptées à notre cas et l'algorithme du Complexe de Box [2] plus sensible à la présence de minima locaux que l'algorithme génétique. D'autre part, l'algorithme génétique a l'avantage de converger relativement rapidement au début du processus comme le montre la Fig. 2.

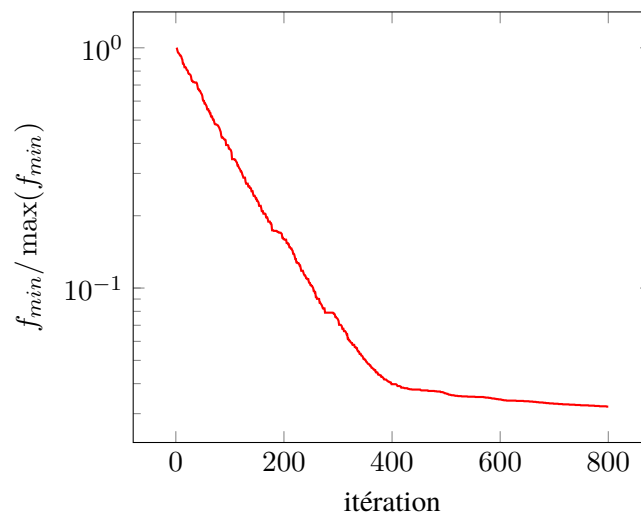


Fig. 2 – Meilleur individu de la population de l'algorithme génétique pour l'identification des modules d'Young de l'état 5 de déformation du matériau fibreux (voir Fig. 5)

Ce type d'algorithme consiste à considérer une population d'individus qui vont évoluer, selon certains principes issus de la sélection naturelle darwinienne, afin de s'adapter à la fonction à minimiser. Parmi les opérateurs génétiques utilisés, il y a l'opérateur de sélection, de recombinaison et de mutation. Ces opérateurs servent respectivement à sélectionner les individus les plus aptes à se reproduire, à combiner les gènes de ces individus sélectionnés entre eux (parents) pour obtenir de nouveaux individus (enfants) et enfin à muter les gènes de ces derniers. La réinsertion de chaque nouvelle génération dans la population totale permet alors itérativement de converger vers des valeurs proches du minimum global recherché.

5 Parallélisation

Depuis un certain nombre d'années, les calculs sont de plus en plus intensifs pour les machines informatiques et coûteux en temps pour les utilisateurs du fait de la complexité et du nombre d'opérations à effectuer. Cela a permis le développement de nouveaux outils tel que la parallélisation des tâches pour réduire considérablement le coût de ces calculs.

Dans notre cas, le calcul de la fonctionnelle est l'opération la plus coûteuse, de surcroît quand la taille du système linéaire augmente. Le paradigme particulièrement adapté à ce genre de situation est le paradigme maître-esclaves. Il s'agit de répartir, de façon la plus équitable possible, la charge de travail normalement exécutée séquentiellement sur un seul processus (maître) sur un certain nombre de processus parallèles (esclaves). Le principe est schématisé en Fig. 3. En retour, chaque processus esclave renvoie la valeur de la fonctionnelle qu'il a calculé au processus maître.

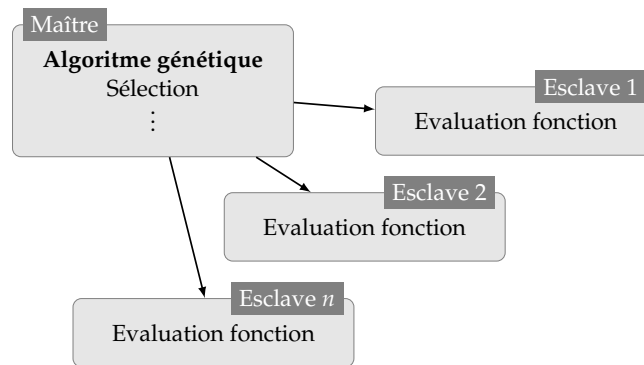


Fig. 3 – Principe d'un algorithme génétique en parallèle de type maître-esclaves

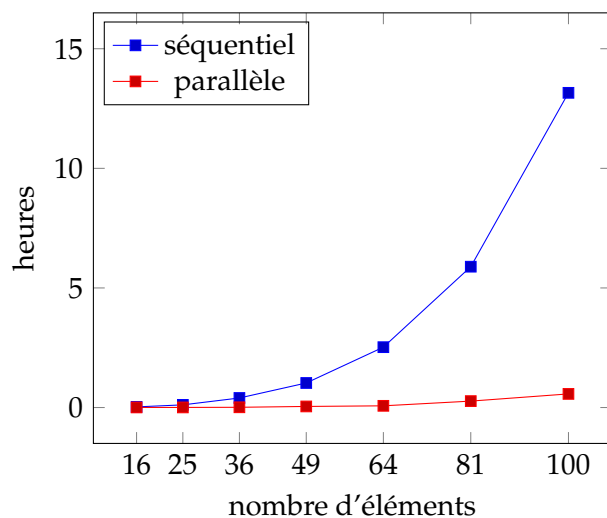


Fig. 4 – Évolution du temps de calcul en fonction du nombre de modules d'Young à identifier

La Fig. 4 montre l'efficacité de la parallélisation lors de l'identification de cas simulés, non présentés ici, pour différents nombres de modules à identifier. Tous ces cas ont été réalisés sur le ordinateur Thor de l'Institut Pprime en utilisant 40 cœurs. Il est à noter que le nombre de cœurs utilisés est très dépendant de la charge de travail et fait l'objet d'une optimisation avant les calculs.

6 Expérimentations

Une sollicitation de compression a été appliquée sur un échantillon de matériau fibreux préalablement découpé à une longueur d'environ 10 mm pour un diamètre d'environ 9 mm. Le microtomographe de l'Institut Pprime a été utilisé pour obtenir les images volumiques et le logiciel CorrelVol développé par l'équipe pour obtenir les champs de déplacements tridimensionnels de l'éprouvette du matériau.

7 Résultats

La Fig. 5 montre les modules d'Young identifiés à partir des champs mesurés sur le matériau fibreux. Les valeurs augmentent avec le taux de compression imposé. En superposant une tranche du volume identifié avec la microstructure du matériau (Fig. 6), on remarque une bonne corrélation entre les valeurs

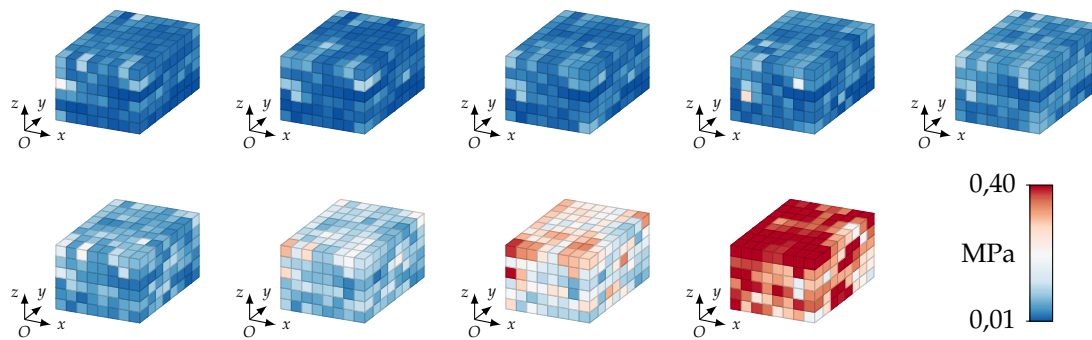


Fig. 5 – Modules d'Young identifiés pour 9 états de déformation de l'échantillon de matériau fibreux

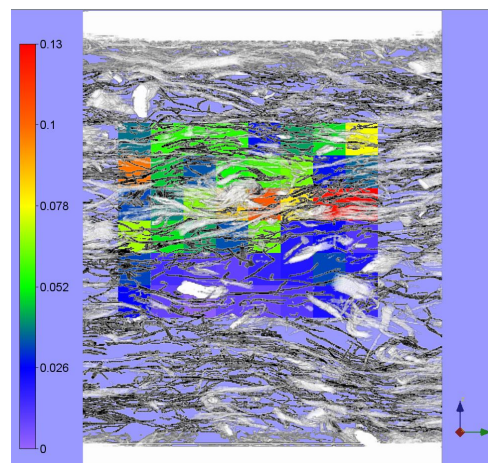


Fig. 6 – Superposition des modules identifiés avec la microstructure dans la tranche (y, z) pour $x = 2.26$ mm

de modules identifiés et la présence des fibres. En effet, plus il y a de fibres dans une région du matériau, plus le module d'Young sera élevé en première approximation.

8 Conclusion

Ce travail présente les résultats de la méthode de recalage de modèle éléments finis dans le cadre délicat de l'identification locale volumique. Les premiers résultats montrent qu'elle permet d'identifier des valeurs mécaniquement significantes sur le matériau fibreux.

9 Perspectives

La méthode reposant sur un processus itératif, même après la parallélisation, elle reste coûteuse en temps. Une optimisation de l'opération d'assemblage peut être envisagée pour améliorer les performances du code. Enfin, une perspective intéressante serait d'implémenter une loi non-linéaire afin de mieux approcher le comportement réel du matériau.

Références

- [1] H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems, an introductory analysis with application to biology, control and artificial intelligence*, The University of Michigan Press, 1975.

- [2] M. J. Box, A new method of constrained optimization and a comparison with other methods, The Computer Journal, Oxford University Press, 8 (1965) 42–52.