

Modélisation multiphasique pour la fissuration des milieux renforcés par fibres

Jeremy Bleyer

► **To cite this version:**

Jeremy Bleyer. Modélisation multiphasique pour la fissuration des milieux renforcés par fibres. JST : Homogénéisation et calcul multi-échelles dans les matériaux hétérogènes et structures composites, Oct 2019, Champs-sur-Marne, France. hal-02434324

HAL Id: hal-02434324

<https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-02434324>

Submitted on 9 Jan 2020

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.

Modélisation multiphasique pour la fissuration des milieux renforcés par fibres

Multiphase model for fracture in fiber-reinforced media

Jérémy Bleyer¹

¹ : Laboratoire Navier UMR 8205 (ENPC,IFSTTAR,CNRS)
Université Paris-Est
6-8 avenue Blaise Pascal, Cité Descartes, 77455 Champs-sur-Marne
e-mail : jeremy.bleyer@enpc.fr

Résumé

Afin de modéliser les milieux renforcés par fibres, nous considérons une classe particulière de milieux généralisés, appelés *milieux multiphasiques*, qui consistent en une superposition de différentes phases, possédant chacune leur cinématique propre, et en interaction entre elles. Une procédure d'homogénéisation a été développée pour de tels milieux afin d'en calculer les propriétés matérielles généralisées. De tels modèles permettent de décrire, du point de vue macroscopique, des phénomènes de pontage de fissures ou de décohésion de fibres. Un modèle variationnel de champ de phase pour la matrice, combiné à une loi de décohésion de l'interface est proposé pour simuler la fissuration matricielle pontée par des fibres intactes.

Abstract

In order to model fiber-reinforced media, we consider a particular class of generalized continua, called *multiphase models*, which consist of different media possessing their own kinematics and in interaction with each other. A homogenization approach has been developed for computing the generalized constitutive material parameters. Such models enable to describe, in a macroscopic fashion, phenomena like bridged cracks or fiber debonding. A variational phase-field model for the matrix phase combined with a debonding damage law for the interaction between both phases is proposed for simulating matrix cracks bridged by intact fibers.

Mots Clés : milieux généralisés, champ de phase, fissuration, décohésion, milieux fibrés

Keywords : generalized continua, phase-field model, fracture, debonding, fiber-reinforced media

1. Introduction

La fissuration de milieux renforcés par des fibres (composites, bétons fibrés, systèmes renforcés par collage) présente une phénoménologie complexe qu'il est parfois difficile de modéliser d'une manière unifiée. En effet, outre la forte anisotropie de tels milieux, leur fissuration s'accompagne, en général, de fissuration matricielle transverse, de fissuration perpendiculaire aux fibres pour laquelle la fissure est pontée par les fibres (*crack bridging*), de décohésion, d'arrachement ou de rupture des fibres. De tels systèmes, chargés dans le sens des fibres, présentent en général une multi-fissuration de la phase matrice tandis que les fibres assurent une tenue résiduelle de la structure, lui offrant une certaine ductilité apparente. L'optimisation de tels systèmes repose alors sur un bon équilibre entre la fissuration matricielle et la décohésion des fibres jusqu'à la rupture de ces dernières.

La modélisation de tels phénomènes par un milieu continu classique ne peut alors se faire qu'en postulant une loi de comportement apparente prenant en compte, de façon macroscopique, les différentes sources d'endommagement mentionnées pour la phase matrice, l'interface ou les fibres. L'identification d'une telle loi peut donc s'avérer complexe et ne permet pas forcément de bien comprendre le fonctionnement de ces systèmes puisque les différents

mécanismes de dégradation ne sont pas modélisés de façon indépendante. Enfin, ces systèmes présentent également des effets d'échelle importants qu'une modélisation classique échoue à prendre en compte.

2. Modèle multiphasique

Pour pallier ces différentes difficultés, nous proposons de modéliser ces systèmes renforcés à travers un milieu continu généralisé appelé *modèle multiphasique* [3, 4] qui consiste en la superposition de deux phases (matrice et renfort par exemple) possédant chacune leur cinématique propre (déplacements \underline{u}^m et \underline{u}^r). Chaque phase $i = m, r$ est décrite comme un milieu de Cauchy classique avec une déformation $\underline{\underline{\varepsilon}}^i = \underline{\nabla}^s \underline{u}^i$ et une contrainte partielle $\underline{\underline{\sigma}}^i$ qui lui est propre. Les efforts généralisés du modèle multiphasique incluent également un effort d'interaction \underline{I} entre les deux phases, associé par dualité au déplacement relatif $\underline{u}^r - \underline{u}^m$. Le milieu continu de Cauchy classique est alors retrouvé lorsque l'on fait l'hypothèse d'adhérence parfaite entre les deux phases $\underline{u} = \underline{u}^m = \underline{u}^r$, la contrainte totale de Cauchy étant alors donnée par $\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{\sigma}}^m + \underline{\underline{\sigma}}^r$.

2.1. Comportement élastique

Le comportement élastique d'un tel milieu peut alors s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}\underline{\underline{\sigma}}^m &= \mathbb{D}^{mm} : \underline{\underline{\varepsilon}}^m + \mathbb{D}^{mr} : \underline{\underline{\varepsilon}}^r \\ \underline{\underline{\sigma}}^r &= (\mathbb{D}^{mr})^T : \underline{\underline{\varepsilon}}^m + \mathbb{D}^{rr} : \underline{\underline{\varepsilon}}^r \\ \underline{I} &= \underline{\underline{\kappa}} \cdot \llbracket \underline{u} \rrbracket\end{aligned}\tag{Eq. 1}$$

où les \mathbb{D}^{ij} représentent des modules d'élasticité partiels et $\underline{\underline{\kappa}}$ une raideur d'interaction entre les phases.

Une procédure d'homogénéisation a été proposée dans [3] afin de calculer ces différents paramètres à partir des paramètres matériaux des constituants. Cette procédure permet en particulier de justifier le découplage entre le comportement de chaque phase ($\mathbb{D}^{mr} = 0$) lorsque les inclusions ont un contraste de raideur très élevé et sont en faible fraction volumique.

Le modèle multiphasique présente un effet d'échelle (longueur caractéristique ℓ_b) à travers la raideur d'interaction $\kappa \sim 1/s^2$ qui est proportionnelle au carré inverse de la taille caractéristique s des hétérogénéités. Lorsque l'on a séparation d'échelle ($s \rightarrow 0$), la raideur devient infinie et impose donc une adhérence parfaite entre les phases.

2.2. Fissure matricielle pontée par des fibres

L'utilisation d'un modèle multiphasique permet, en particulier, de prescrire des conditions aux limites différentes pour chacune des phases. Par exemple, nous considérons le cas d'une traction d'un milieu présentant une fissure matricielle au milieu de l'éprouvette (Figure 1). Compte-tenu de la symétrie du problème, nous pouvons imposer, au niveau de la fissure, des conditions de bords libres pour la phase matricielle et des conditions de déplacement horizontal nul pour la phase fibre. La comparaison avec un calcul d'un milieu fibre/matrice hétérogène montre que le modèle multiphasique reproduit très bien l'ouverture de la fissure matricielle qui varie en fonction du nombre de fibres ainsi que les contraintes de cisaillement à l'interface fibre/matrice (Figure 2).

3. Modélisation de la fissuration matricielle et de la décohésion fibre/matrice

Le modèle multiphasique est ensuite étendu à une modélisation de la fissuration fragile de la phase matrice, d'énergie de fissuration G_c^m . Nous régularisons la représentation de la fissuration

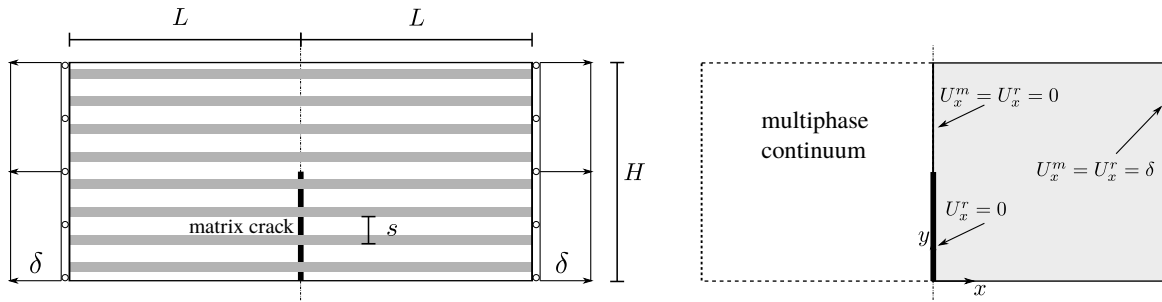


Fig. 1. Problème de traction d'un milieu renforcé par fibres avec pontage d'une fissure matricielle : modélisation explicite des fibres (gauche), modélisation multiphasique et ses conditions aux limites (droite)

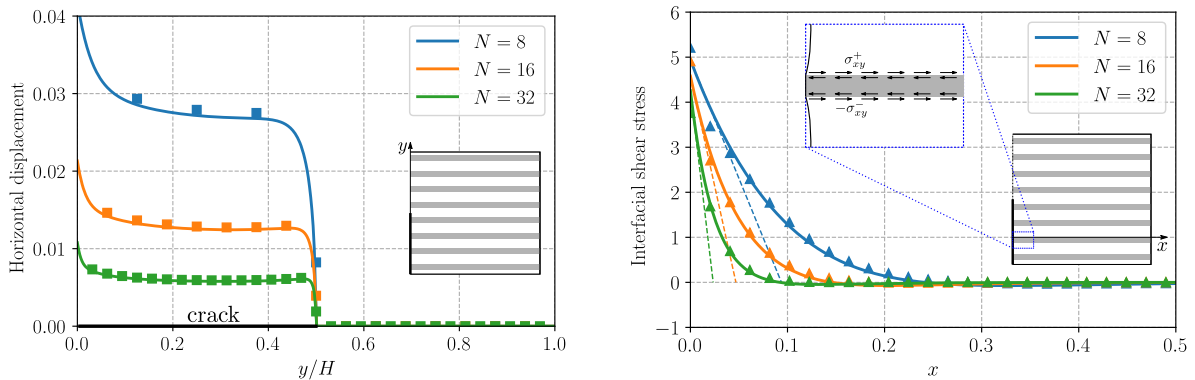


Fig. 2. Comparaison entre calculs EF hétérogènes (symboles) et modèle multiphasique (traits pleins) pour différents nombres total N de fibres : ouverture de la fissure matricielle (gauche) et contrainte de cisaillement le long de l'interface (droite)

matricielle par un modèle de type champ de phase (ou à gradient d'endommagement) de longueur interne de régularisation ℓ_0 . Ce dernier (noté d) ne porte que sur la contrainte matricielle, la densité d'énergie élastique pour les deux phases est alors de la forme :

$$\psi(\underline{\underline{\varepsilon}}^m, \underline{\underline{\varepsilon}}^r, d) = \frac{1}{2}(1-d)^2 \underline{\underline{\varepsilon}}^m : \mathbb{C}^m : \underline{\underline{\varepsilon}}^m + \frac{1}{2} \underline{\underline{\varepsilon}}^r : \mathbb{C}^r : \underline{\underline{\varepsilon}}^r \quad (\text{Eq. 2})$$

La raideur d'interaction entre les deux phases est elle aussi endommagée par un paramètre α à travers une loi cohésive $I(\llbracket u \rrbracket, \alpha)$ associée à une énergie de fissuration de l'interface G_c^i .

La mise en oeuvre numérique (à l'aide de la librairie FEniCS) de ce modèle de fissuration/décohésion (similaire à ceux proposés dans [2, 1]) permet alors d'observer une multi-fissuration de la phase matrice, accompagnée d'une décohésion plus ou moins importante de l'interface en fonction du rapport d'énergies G_c^m/G_c^i . La multi-fissuration de la matrice fournit une ductilité apparente au composite et l'espacement des fissures est lié à la longueur caractéristique ℓ_b du modèle multiphasique (Figure 3).

Références

- [1] R Alessi and F Freddi. Phase-field modelling of failure in hybrid laminates. *Composite Structures*, 181 :9–25, 2017.
- [2] AA León Baldelli, J-F Babadjian, Blaise Bourdin, Duvan Henao, and Corrado Maurini. A variational model for fracture and debonding of thin films under in-plane loadings. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 70 :320–348, 2014.

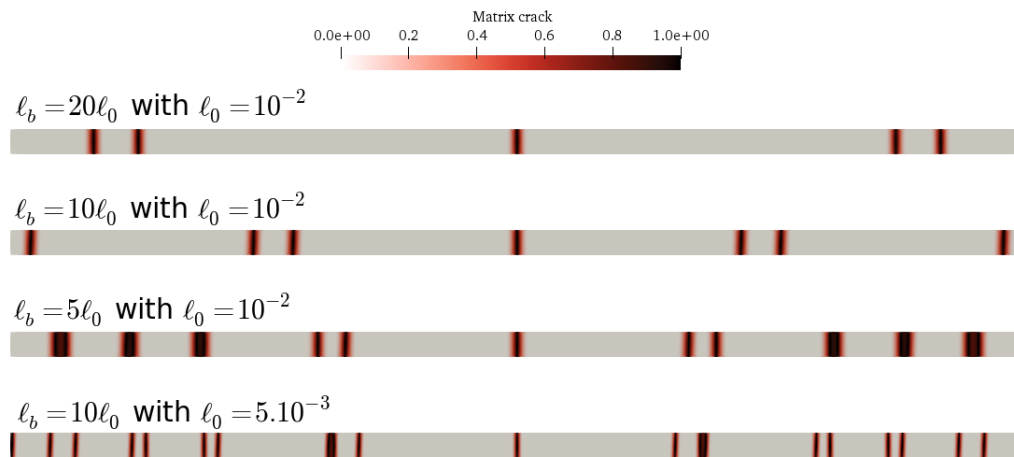


Fig. 3. Multi-fissuration d'un milieu multiphasique en traction pour différentes longueurs internes du modèle l_b pour le même niveau de sollicitation

- [3] Jeremy Bleyer. Multiphase continuum models for fiber-reinforced materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 121 :198–233, 2018.
- [4] Patrick De Buhan, Jérémy Bleyer, and Ghazi Hassen. *Elastic, Plastic and Yield Design of Reinforced Structures*. Elsevier, 2017.