



Approche multiéchelle du comportement mécanique des matériaux composites à renfort tissé = Multiscale modelling of the mechanical behaviour of woven composite materials

Guillaume Couégnat, Eric Martin, Jacques Lamon, Nicolas Carrère

► **To cite this version:**

Guillaume Couégnat, Eric Martin, Jacques Lamon, Nicolas Carrère. Approche multiéchelle du comportement mécanique des matériaux composites à renfort tissé = Multiscale modelling of the mechanical behaviour of woven composite materials. Philippe OLIVIER et Jacques LAMON. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. AMAC, 8 p., 2009. <hal-00391754>

HAL Id: hal-00391754

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00391754>

Submitted on 11 Jun 2009

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.

Approche multiéchelle du comportement mécanique des matériaux composites à renfort tissé

Multiscale modelling of the mechanical behaviour of woven composite materials

Guillaume Couégnat¹, Eric Martin¹, Jacques Lamon¹ et Nicolas Carrère²

1 : Laboratoire des Composites Thermostructuraux
UMR 5081 (CNRS-Snecma-CEA-UB1), 3 allée de la Boétie – F - 33600 Pessac
e-mail : {couegnat,martin,lamon}@lcts.u-bordeaux1.fr

2 : ONERA/DMSC
29 avenue de la Division Leclerc – F - 92320 Châtillon
e-mail : carrere@onera.fr

Résumé

Cet article présente une modélisation multiéchelle du comportement mécanique des matériaux composites à renfort tissé. Le modèle proposé (DMD) repose sur une description de l'architecture du renfort tissé, l'arrangement des constituants et leurs modes d'endommagement. Le modèle développé est identifié et validé pour un matériau composite tissé à matrice céramique, et appliqué à des cas tests de calcul de structure.

Abstract

The present paper proposes a multiscale model of the mechanical behaviour of woven composite materials. The DMD model is based on a physical description of the reinforcement geometry of the material and the damage mechanisms. The model is applied to a woven ceramic-matrix composite material and its predictive capabilities are investigated.

Mots Clés : composites tissés, endommagement, approche multiéchelle, composites à matrice céramique
Keywords : textile composites, damage mechanics, multiscale modelling, ceramic-matrix composites

1. Introduction

Les matériaux composites présentent un ensemble de propriétés mécaniques remarquables qui permettent d'envisager leur emploi en tant qu'éléments structuraux dans des applications aéronautiques et spatiales. Toutefois, leur utilisation reste encore limitée par le relatif manque de confiance dans les modèles de comportement actuels. Basés sur des approches phénoménologiques, ces modèles conduisent à de forts surdimensionnements et à d'importants surcoûts expérimentaux de qualification.

L'amélioration des méthodes de dimensionnement des structures composites requiert le développement de techniques de calculs et de lois de comportement plus adaptées. Des approches multiéchelles basées sur une description micromécanique de l'endommagement ont été récemment proposées pour les matériaux composites stratifiés à matrice organique [1,2]. L'extension de ce type d'approche au cas de matériaux composites plus complexes comme les composites à renfort tissé (Fig. 1) et/ou à matrice céramique nécessite le développement de modèles de changement d'échelle spécifiques.

L'objectif du travail présenté dans cet article est la formulation et la mise en œuvre dans un code de calcul d'un modèle de comportement multiéchelle adapté aux composites tissés, et plus particulièrement aux composites à matrice céramique (CMC).

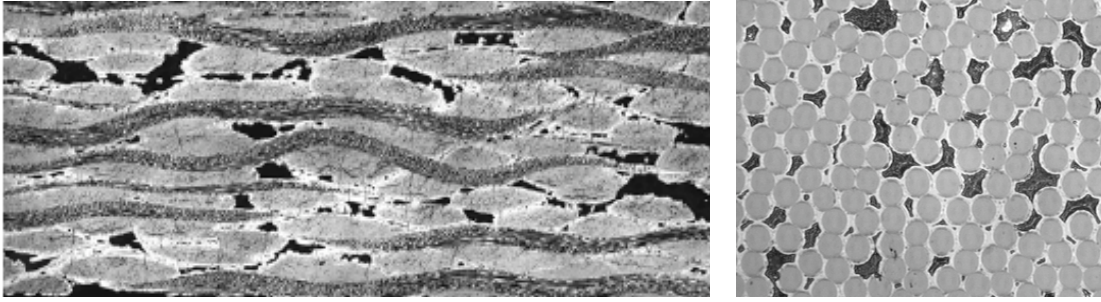


Fig. 1. Microstructure typique d'un CMC tissé.
Echelle du renfort (gauche) et échelle d'un fil (droite).

2. Approche DMD (Discrete Micro Damage)

2.1 Ecriture du modèle d'endommagement

Le modèle proposé reprend le formalisme des modèles macroscopiques développés dans le cadre de la mécanique des milieux continus [3], mais en introduisant des variables d'endommagement décrivant directement l'état physique de l'endommagement aux échelles inférieures.

L'objectif du modèle est de relier quantitativement la description microstructurale de l'endommagement à ses effets sur les propriétés mécaniques effectives du matériau, par exemple :

$$\tilde{\mathbf{C}} = f(d_1, \dots, d_n) \quad (\text{eq. 1})$$

où $\tilde{\mathbf{C}}$ est le tenseur des rigidités du matériau, et (d_1, \dots, d_n) un ensemble de variables microstructurales décrivant l'état d'endommagement (c'est-à-dire densité de fissures, surface décochée, etc.). L'approche la plus naturelle est alors de choisir directement les variables de description physique de l'endommagement comme variables internes du modèle.

Pour une écriture en déformation, le potentiel thermodynamique peut se mettre sous la forme [4] :

$$2\rho\psi = (\mathbf{e} - \mathbf{e}^0 - \mathbf{e}^{th}) : \tilde{\mathbf{C}} : (\mathbf{e} - \mathbf{e}^0 - \mathbf{e}^{th}) + (\mathbf{e} - \mathbf{e}^0 - \mathbf{e}^{th}) : \tilde{\mathbf{C}}^0 : \mathbf{e}^0 + \mathbf{e}^0 : \tilde{\mathbf{C}}^0 : (\mathbf{e} - \mathbf{e}^0 - \mathbf{e}^{th}) \quad (\text{eq. 2})$$

en notant \mathbf{e} le tenseur des déformations totales, \mathbf{e}^{th} le tenseur des déformations d'origine thermique, \mathbf{e}^0 le tenseur des déformations résiduelles. Le tenseur des rigidités effectives $\tilde{\mathbf{C}}$ est défini comme :

$$\tilde{\mathbf{C}} = (\mathbf{C}^0 - \mathbf{D}(d_1, \dots, d_n)) \quad (\text{eq. 3})$$

avec \mathbf{D} le tenseur d'effet du dommage,

$$\mathbf{D} = D_{ij} = h_{ij}(\eta_1 d_1, \dots, \eta_n d_n) \cdot C_{ij}^0 \quad (\text{eq. 4})$$

et où h_{ij} représente la perte de rigidité relative de la composante (i,j) pour l'état d'endommagement décrit par (d_1, \dots, d_n) et η_k est un index de fermeture permettant de prendre en compte le caractère unilatéral de l'endommagement.

Cette formulation permet d'obtenir une loi de comportement macroscopique homogénéisée mais définie à partir d'une description de l'état de fissuration aux échelles inférieures. L'effet de l'endommagement sur les propriétés mécaniques est obtenu à travers le tenseur \mathbf{D} qui relie un état d'endommagement décrit par (d_1, \dots, d_n) au tenseur effectif des rigidités $\tilde{\mathbf{C}}$. Une des principales étapes de l'identification du modèle DMD repose donc sur l'estimation du tenseur des effets de l'endommagement.

2.2 Stratégie numérique pour l'identification des effets de l'endommagement

La stratégie d'identification, inspirée par les travaux de Costanzo [4] consiste à estimer numériquement le tenseur d'effet de l'endommagement \mathbf{D} à partir de calculs par éléments finis sur des cellules élémentaires représentatives du matériau dans lesquelles l'endommagement est introduit de manière discrète.

En pratique, on se donne un nombre fini de configurations d'endommagement, physiquement réalistes, définies par (d_1, \dots, d_n) . Pour chacune de ces configurations, l'endommagement est introduit dans une cellule en générant des fissures au sein d'un maillage éléments finis. Les propriétés effectives de la cellule endommagée sont alors estimées numériquement par homogénéisation périodique, ce qui permet d'estimer l'effet h_{ij} de l'endommagement (d_1, \dots, d_n) . Finalement, les valeurs des h_{ij} sont interpolées sur tout l'espace d'endommagement (d_1, \dots, d_n) et le tenseur \mathbf{D} est approximé par une fonction polynomiale

La mise en œuvre numérique de l'identification nécessite donc la génération de maillages éléments finis de cellules élémentaires représentatives aux différentes échelles du matériau, et l'introduction discrète de l'endommagement au sein de ces cellules.

3. Modélisation géométrique et maillage de cellules élémentaires

3.1 Cellules élémentaires à l'échelle micro

La morphologie de la microstructure à l'échelle micro est gouvernée par l'arrangement des fibres au sein d'un fil (Fig. 2). Cet arrangement peut être caractérisé par analyse d'image en calculant la covariance de la microstructure à partir de micrographies [5].

Des cellules représentatives contenant un nombre restreint fibres peuvent ensuite être construites à partir de la covariance de la microstructure complète. Les positions des fibres au sein de la cellule élémentaire, initialement choisies de manière aléatoire, sont optimisées de façon à ce que la covariance de la cellule élémentaire soit le plus proche possible de celle de la microstructure de référence.

A partir de la position optimale des fibres ainsi déterminée, un modèle géométrique de la cellule élémentaire est généré : dans le cas des CMC, l'interphase et la matrice sont modélisées comme des dépôts concentriques à partir de la surface des fibres. Un maillage éléments finis est ensuite réalisé à partir de ce modèle géométrique (Fig. 2).

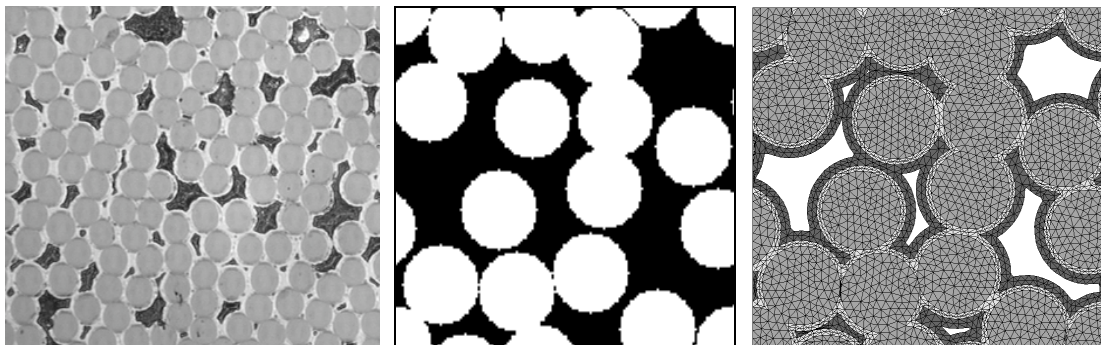


Fig. 2. Arrangement de fibres au sein d'un fil CMC (gauche), positions optimales des fibres obtenues par analyse de la covariance (milieu), maillage EF d'une cellule élémentaire (droite).

La représentativité géométrique et mécanique de ces cellules ainsi générées ont été vérifiées : les résultats des calculs [4] montrent que des cellules contenant de 20 à 30 fibres sont suffisantes pour obtenir une estimation correcte des propriétés élastiques effectives d'un fil complet.

3.2 Cellules élémentaires à l'échelle méso

Les cellules élémentaires à l'échelle du renfort tissé sont réalisées en deux étapes. La première consiste à calculer la géométrie de la préforme tissée à partir de la séquence de tissage et des propriétés géométriques des fils. La géométrie de la préforme dans un état relaxé est obtenue en minimisant l'énergie de flexion des fils [6].

La seconde étape consiste à générer un modèle volumique du renfort tissé et de la matrice à partir de la géométrie de la préforme. Un maillage surfacique de chaque fil est tout d'abord réalisé. Le renfort est obtenu en assemblant les maillages des fils. Le maillage de la matrice s'obtient quant à lui en dilatant les

maillages des fils de l'épaisseur de matrice déposée, et en retirant le volume correspondant initialement aux fils. Les opérations booléennes (union, soustraction) entre les différentes entités sont directement réalisées directement sur les maillages [7]. Le maillage final de la cellule complète s'obtient en fusionnant les maillages du renfort et de la matrice (Fig. 3).

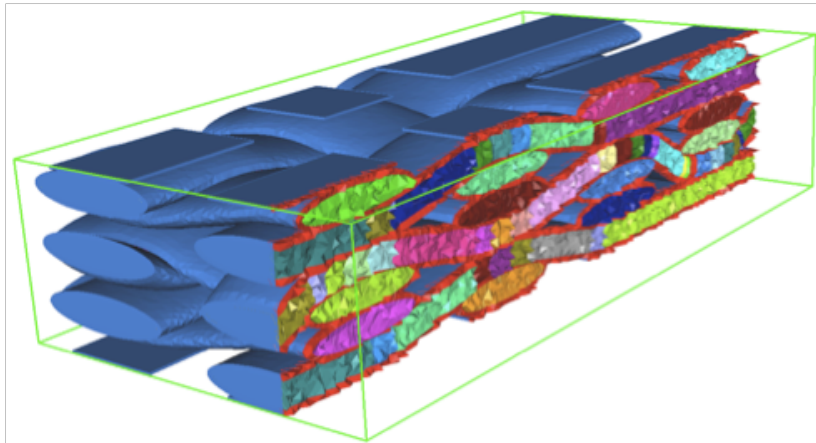


Fig. 3. Cellule élémentaire représentative d'un CMC tissé à l'échelle méso.

4. Application du modèle DMD à un CMC tissé

L'identification du modèle DMD a été menée sur un matériau composite tissé multicouche à matrice céramique élaboré par Snecma Propulsion Solide (groupe SAFRAN).

4.1 Identification des effets de l'endommagement

Les principaux mécanismes d'endommagement observés expérimentalement pour ce type de matériau CMC sont, à l'échelle microscopique, la fissuration matricielle intrafil et les ruptures de fibres, et à l'échelle mésoscopique, la fissuration matricielle interfil et de la fissuration transverse des fils (Fig. 4). De plus, chaque mécanisme de fissuration est accompagné de décohésions aux interfaces fibre/matrice et fil/matrice.

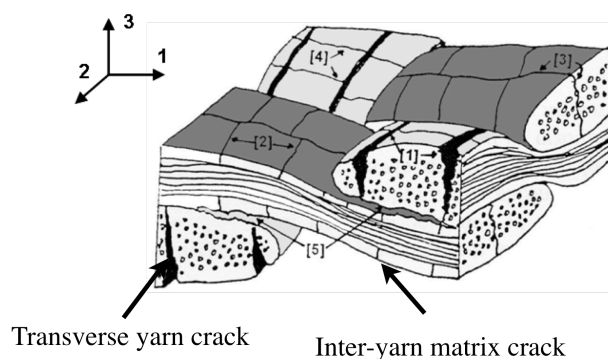


Fig. 4. Représentation schématique des modes d'endommagement à l'échelle méso.

Comme évoqué précédemment, un variable d'endommagement est introduite pour chaque mode d'endommagement élémentaire (fissuration et décohésion). Il faut souligner que, pour le matériau étudié, l'endommagement reste principalement orienté par les axes du renfort, et ce même pour des sollicitations hors-axes. Cela réduit donc le nombre de configuration d'endommagement à explorer.

L'effet des différents modes d'endommagement est calculé en introduisant des états d'endommagement représentatifs des scénarios observés expérimentalement dans des cellules élémentaires (Fig. 5). Les propriétés effectives des fils sont d'abord obtenues par homogénéisation de cellules endommagées à l'échelle microscopique (c.-à-d. en présence de fissuration matricielle intrafil et de ruptures de fibres). Puis, les propriétés macroscopiques du matériau sont obtenues à leur tour par homogénéisation des cellules élémentaires mésoscopiques.

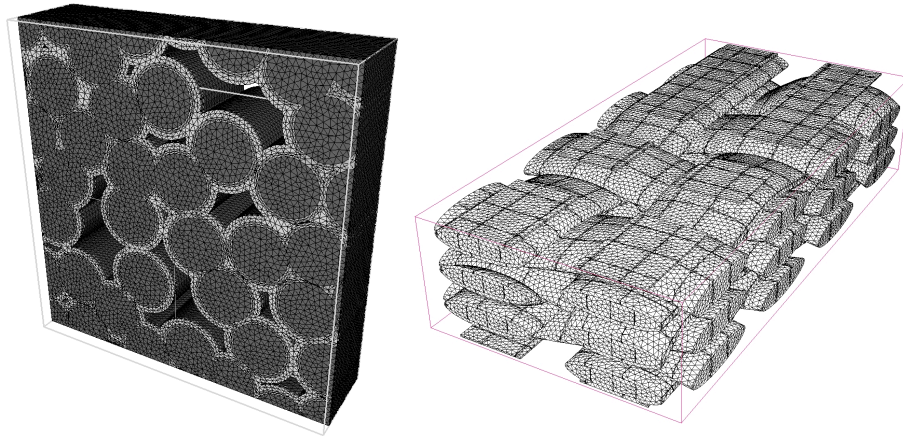


Fig. 5. Cellules élémentaires représentatives à l'échelle micro (gauche) et à l'échelle méso (droite) du matériau CMC tissé étudié. A noter que l'endommagement a été introduit dans la cellule méso.

A partir des résultats de ces calculs d'homogénéisation, des surfaces de réponses sont construites par interpolation (Fig. 6). Ces surfaces permettent alors d'estimer le tenseur d'effet de l'endommagement \mathbf{D} , et par suite, les propriétés effectives du matériau pour un état d'endommagement quelconque.

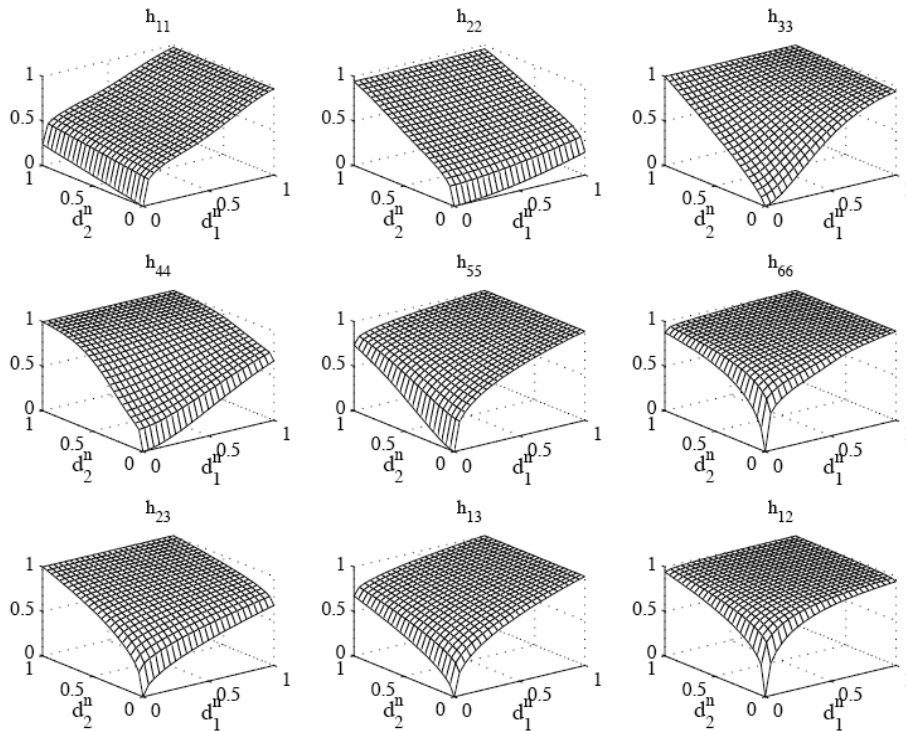


Fig. 6. Evolution des composantes h_{ij} du tenseur de l'effet de l'endommagement \mathbf{D} en fonction de deux variables d'endommagement micro correspondant à la fissuration matricielle interfil dans les directions du renfort.

4.2 Identification des cinétiques d'endommagement

Les cinétiques d'endommagement des différents mécanismes, c.-à-d. l'évolution des variables d'endommagement en fonction de la sollicitation, sont identifiées à partir d'un seul essai de traction dans les axes du renfort (Fig. 7).

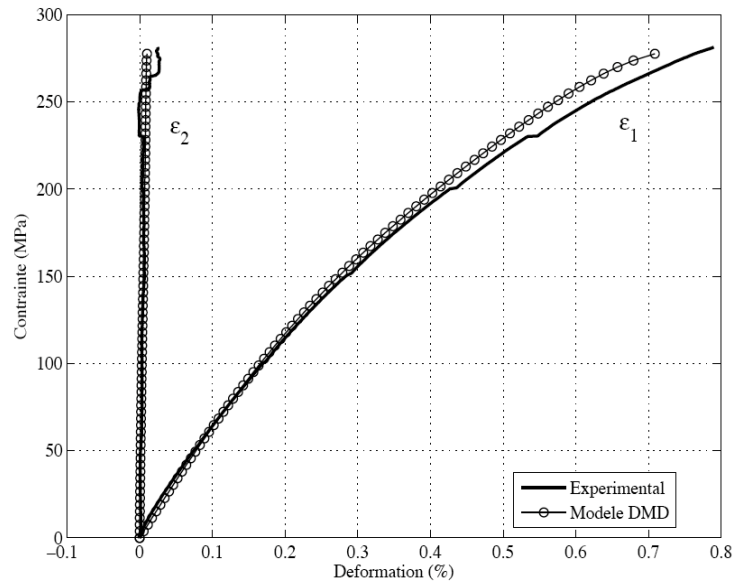


Fig. 7. Courbes de comportement expérimentale et identifiée sur un essai de traction monotone pour le matériau CMC tissé.

Les paramètres des fonctions décrivant les cinétiques d'endommagement ont été identifiés par méthode inverse. L'admissibilité physique des cinétiques ainsi identifiées a ensuite été validée grâce à des observations *in-situ* de l'évolution des réseaux de fissure réalisées en cours d'essai.

4.3 Validation du modèle DMD

Le modèle DMD a ensuite été validé sur des essais de tractions hors-axes à 22,5° et 45° (Fig. 8) qui correspondent du point de vue matériau à une combinaison de chargement de traction et de cisaillement.

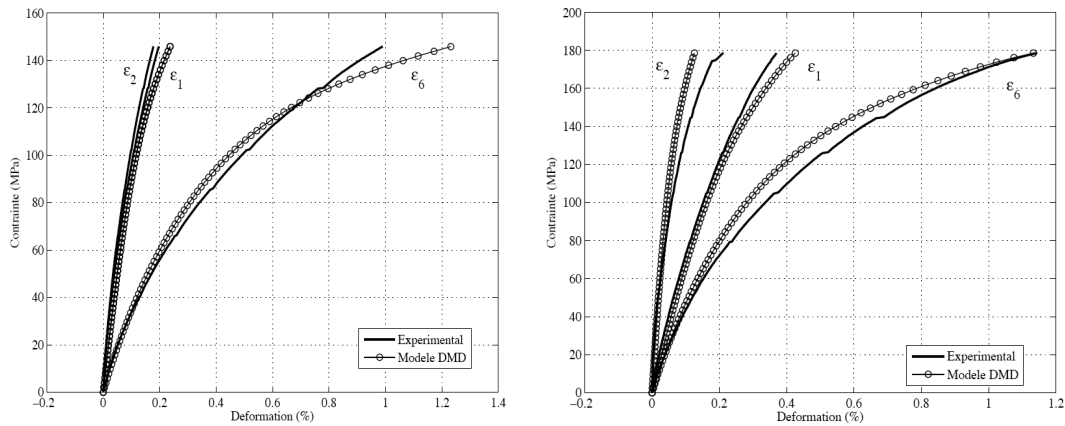


Fig. 8. Courbes de comportement expérimentales et simulées pour des essais de traction hors-axes à 45° (gauche) et 22,5° (droite).

Les simulations réalisées avec le modèle DMD donnent des résultats très proches des courbes expérimentales. Il faut rappeler ici que l'identification des cinétiques n'a été réalisée que sur un seul essai de traction. L'identification numérique des effets de l'endommagement permet donc de prévoir correctement les couplages traction/cisaillement et leurs effets sur le comportement effectif du matériau. De plus, les couplages sont directement déterminés par les surfaces de réponses, sans qu'il soit nécessaire d'introduire de paramètres matériaux supplémentaires.

4.4 Application dans un cadre de calcul de structure

Le modèle DMD a été implanté dans le code de calcul ZéBuLoN [8] et appliqué à des cas simples de calcul de structure : traction sur éprouvette à double entailles décalées, plaque trouée en torsion, et dépliage de cornière. Les résultats obtenus avec le modèle DMD ont été comparés à ceux d'un modèle

macroscopique de référence développé à l'ONERA [9]. Dans tous les cas considérés, le modèle DMD se comporte au moins aussi bien que le modèle de référence au niveau de la réponse globale de la structure (voir par exemple, Fig. 9).

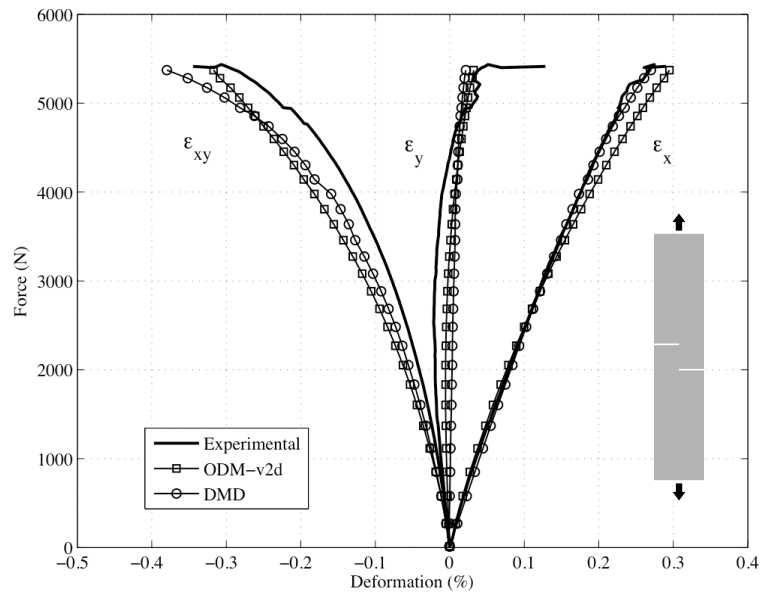


Fig. 9. Courbes de comportement expérimentales et simulées pour l'essai de traction sur éprouvette à double entailles décalées.

De plus, par rapport à un modèle purement macroscopique, le modèle DMD, de par sa nature multiéchelle, permet d'accéder directement à la description locale de l'état d'endommagement (densités de fissure, longueurs de décohesion) aux différentes échelles du matériau. Par exemple, l'évolution de la densité de fissuration matricielle pour l'essai de traction sur l'éprouvette entaillée est représentée à la Fig. 10. On constate que la fissuration matricielle est maximale dans la zone centrale de l'éprouvette entre les entailles, ce qui correspond à la zone de rupture de l'éprouvette (Fig. 11).

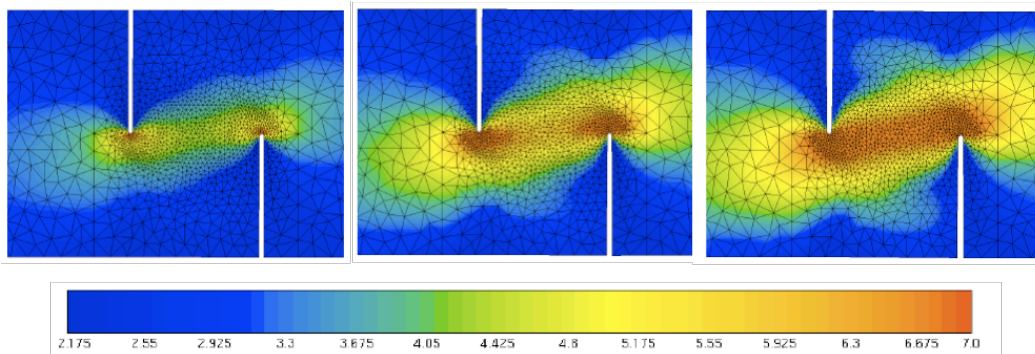


Fig. 10. Evolution de la densité de fissuration matricielle interfil (en mm^{-1}) pour l'essai de traction sur éprouvette entaillée pour $F=2270\text{N}$ (gauche), 4140N (centre) et 5320N (droite).

La description micromécanique de l'endommagement facilite l'interprétation des résultats des calculs. La qualité de la simulation peut être évaluée non seulement en terme de réponse globale de la structure, mais également en terme d'évolution microstructurale locale. Cela permettra également à terme le couplage de l'approche DMD proposée avec des modèles physico-chimiques de durée de vie pour la simulation d'essai thermomécanique de fatigue sous environnement oxydant.



Fig. 11. Faciès de rupture de l'éprouvette à double entaille décalées.

5. Conclusion

Une approche multiéchelle du comportement mécanique des matériaux composites tissés a été proposée. Cette approche originale, DMD, repose sur une description de la microstructure (arrangement et propriétés de constituants) et des principaux mécanismes d'endommagement identifiés expérimentalement. La loi de comportement correspondante est définie à partir de variables internes à caractère physique qui représentent directement l'état de fissuration du matériau. Cette formulation permet d'obtenir une loi de comportement macroscopique homogénéisée mais définie à partir d'une description de l'état de fissuration aux échelles inférieures.

La mise en oeuvre du modèle DMD a nécessité le développement de programmes de modélisation de microstructures et de modules de calcul spécifiques : construction et maillage de cellules élémentaires aux échelles microscopiques et macroscopiques, introduction de l'endommagement sous forme discrète, et calcul des propriétés effectives par homogénéisation périodique.

Le modèle DMD a été identifié pour un composite tissé à matrice céramique et validé sur différents essais de traction hors-axe. A partir d'une identification réalisée dans les axes, le modèle DMD permet de prévoir correctement le comportement du matériau pour des sollicitations de traction hors-axes et de cisaillement. Dans un cadre de calcul de structure, les simulations réalisées avec le modèle DMD ont donné des résultats tout à fait comparables en terme de réponse globale de la structure à ceux obtenus avec un modèle macroscopique de référence. Le modèle DMD, de par sa nature multiéchelle, permet également d'accéder directement à la description locale de l'état de fissuration.

Les auteurs tiennent à remercier la DGA/STTC pour son soutien financier au travers du Programme d'Etudes Amont « Analyse Multiéchelle : Recherche Innovante pour les Composites » (AMERICO), coordonné par l'ONERA.

Références

- [1] C. Huchette, « Sur la complémentarité des approches expérimentales et numériques pour la modélisation des mécanismes d'endommagement des composites stratifiés », Thèse de Doctorat, Université Paris 6, 2005.
- [2] P. Ladeveze, G. Lubineau, D. Marsal, « Towards a bridge between the micro- and mesomechanics of delamination for laminated composites », *Composites Science and Technology*, Vol. 66, pp. 698-712, 2006.
- [3] J. Lemaitre, J.-L. Chaboche, « Mécanique des Matériaux Solides », Dunod, 1985.
- [4] G. Couégnat. « Approche multiéchelle du comportement mécanique de matériaux composites à renfort tissé ». Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, 2008.
- [5] D. Jeulin, M. Ostoja-Starzewski, « Mechanics of Random and Multiscale Microstructures », Springer, 2001.
- [6] S. Lomov, A. Gusev, G. Huysmans, A. Prodromou, and I. Verpoest, « Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites », *Composites Science and Technology*, Vol. 60, pp. 2083–2095, 2000.
- [7] S. H. Lo and W. X. Wang. « Finite element mesh generation over intersecting curved surface by tracing neighbours ». *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 41, pp. 351–370, 2005
- [8] <http://www.nwnumerics.com/Zebulon/>
- [9] L. Marcin, N. Carrère, and J. Maire. « A macroscopic visco-elastic-damage model for three-dimensional woven fabric composites ». In : *Proceeding of ECCM13 - 13th European Conference on Composite Materials*, Stockholm, Sweden, 2008.