

Prévision de l'endommagement et de la tenue de structures composites tissées 3D à matrice organique

F. Laurin^a, V. Medeau^{a,b,c}, A. Hurmane^a, J. Rannou^a

^a ONERA-MAS, Université Paris-Saclay: laurin@onera.fr; hurmane@onera.fr; rannou@onera.fr

^b Safran Aircraft Engines, ^c ISAE-Supaero: medeau@onera.fr

Résumé

Les matériaux composites tissés 3D à fibres de carbone et matrice epoxy, de par leurs excellentes performances résiduelles après impact, sont utilisés par le groupe Safran pour la fabrication des aubes Fan ou des carters de rétention dans les dernières générations de moteurs d'avions civils. Pour ces matériaux récemment développés et présentant une architecture tissée 3D particulière, un besoin de compréhension des mécanismes d'endommagement et de rupture a nécessité la réalisation de campagne d'essais multi-instrumentés à l'UTC [1] et l'Onera [2-4] où l'usage de l'émission acoustique, la corrélation d'images numériques et la tomographie X furent précieux en raison de la complexité des phénomènes étudiés. Les essais effectués ont été définis pour étudier deux points majeurs, à savoir (i) les mécanismes d'endommagement tels que la fissuration matricielle diffuse dans le matériau en raison de son architecture, et (ii) la rupture des torons de fibres entraînant une dégradation violente des propriétés mécaniques du matériau. La prévision de la rupture des torons est un point clé pour la prévision de la tenue de structures composites représentatives de problématiques industrielles et fait l'objet de ce travail.

Suite aux travaux expérimentaux de compréhension, un modèle d'endommagement et de rupture spécifique aux matériaux composites tissés 3D à matrice organique, nommé Onera Damage Model pour les Composites à Matrice Organique (ODM-CMO), a été proposé. Dans le but de prévoir la tenue de structures composites représentatives de problématiques industrielles, ce modèle est défini à l'échelle macroscopique et prend en compte les différentes sources de non-linéarité de ces matériaux à savoir (i) la viscoélasticité de la matrice, (ii) la méso-fissuration matricielle et les décohésions inter-toron et (iii) la rupture des torons de fibres qui entraîne la ruine de la pièce.

Le modèle ODM-CMO est un modèle d'endommagement continu à variables scalaires, l'endommagement étant piloté par la microstructure de par le fort contraste entre les constituants (fibre/matrice). Trois variables d'endommagement matriciel sont définies dans les 3 axes matériau pour décrire la fissuration matricielle dans le plan (directions chaîne et trame) et la décohésion inter-toron dans la direction hors-plan. La partie endommagement du modèle a été validée au travers de comparaisons avec les résultats d'essais de traction et compression hors-axes, générant dans le matériau des chargements multiaxiaux permettant de justifier les couplages introduits. Il est nécessaire de prévoir de manière précise l'endommagement matriciel pour bien prévoir la ruine de structures composites de par le report de charge de la matrice fissurée sur les torons de fibres.

Concernant la prévision de la ruine d'éprouvettes élémentaires, une attention particulière a été portée sur la proposition de critères d'amorçage de la rupture des torons de fibres en distinguant les mécanismes de ruine en traction et en compression. En traction, un critère de rupture en déformation maximale permet de prévoir de manière satisfaisante l'ensemble des essais de traction hors-axe disponibles [2] à 22,5°, 45° et 67,5° sur différents tissés 3D déséquilibrés. En compression, le mode de ruine étant le kinking des torons de fibres, un critère prenant en compte l'influence des

cisaillements hors-plan et de la pression hydrostatique a été proposé et a été validé au travers d'essais de compression hors-axes, de flexion rotulée et d'impact [3].

Toutefois, la première rupture de toron de fibres induit localement une chute violente des propriétés mécaniques du matériau composite tissé 3D mais n'induit pas nécessairement la ruine de structure contenant des singularités géométriques. Il convient alors de modéliser ce comportement adoucissant et de s'interroger sur la physique des phénomènes induisant la propagation de ces macro-fissures au sein de matériaux tissés 3D. Une campagne d'essais à l'Onera [4] sur éprouvettes Compact Tension (CT) avec effet d'échelle (variation de la taille des éprouvettes d'un facteur 3) et sur éprouvettes entaillées en flexion 3 points (SENB) a été menée à l'Onera pour définir les quantités pertinentes à introduire dans un modèle. En se basant sur la mécanique non linéaire de la rupture, proposée initialement sur les bétons [5], il a été montré que l'introduction de deux longueurs internes (une en lien avec la taille de la process zone en pointe de fissure et l'autre avec les longueurs de déchaussement des torons de fibres) et du taux de restitution d'énergie critique asymptotique permettait de bien décrire l'ensemble des essais disponibles. Un protocole d'identification a donc été proposé pour déterminer ces paramètres matériaux.

Enfin, pour prévoir la ruine d'une structure composite tissée 3D, il convient d'introduire ce type de comportement adoucissant dans un code éléments finis tout en gérant les problèmes de localisation. Parmi l'ensemble des méthodes de régularisation disponibles dans la littérature, la méthode Phase-Field [6] permet d'introduire les quantités physiques mesurées expérimentalement tout en résolvant les problèmes de dépendance au maillage. Les essais disponibles ont par la suite été simulés avec ce modèle implanté dans le code éléments finis Z-set et permet de reproduire les effets d'échelle observés sur éprouvettes CT et de prévoir la ruine des éprouvettes SENB. Ces résultats sont prometteurs pour la prévision de la ruine de structures composites tissées 3D à matrice organique même si les temps de calcul associés à ce type de méthodologie reste encore élevés et nécessite des travaux complémentaires.

Mots clés : Composites tissés 3D ; Modèle d'endommagement; Simulation éléments finis; Rupture de torons.

Remerciements

Cette étude a été menée dans le cadre des PRC COMPOSITES et MECACOMP, projets co-financés par la DGAC et le groupe Safran, piloté par Safran, et impliquant Safran, l'Onera et le CNRS.

Références

- [1] J. Schneider, Mécanismes d'endommagement dans les composites multicouches à renforts interlock, Thèse, Université Technologique de Compiègne, 2011
- [2] C. Rakotoarisoa, Prévion de la durée de vie en fatigue des composites à matrice organique tissés interlock, Thèse, Université Technologique de Compiègne, 2013
- [3] A. Hurmane, Analyse par un dialogue essais/calculs de la tenue en compression de structures composites tissées 3D, Thèse, Université Technologique de Compiègne, 2015
- [4] V. Medeau, F. Laurin, J. Rannou, A. Hurmane, S. Mousillat, F. Lachaud, Experimental characterization of macro-cracks propagation in 3D woven composites and size effect, Proceedings of Conference 18th European Conference on Composite Materials , Athènes, Grèce, 2018, pp. 1–8
- [5] Z.P. Bazant, J. Planas. Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasi-brittle Materials. CRC Press, 1997.
- [6] C.Miehe et al., Phase field modeling of fracture in porous plasticity. CMAME, 312 (2016) 3-50.