

SIMULATION DE LA RUPTURE DE COMPOSITES TISSÉS 3D ET PRISE EN COMPTE DE L'EFFET D'ÉCHELLE

V. MÉDEAU^{a,b,c}, F. LAURIN^a, J. RANNOU^a, A. HURMANE^a, S. MOUSILLAT^b, F. LACHAUD^c,

^a ONERA-MAS, Université Paris Saclay, victor.medeau@onera.fr et frederic.laurin@onera.fr ;

^b Safran Aircraft Engines ; ^c ISAE-Supaero, frederic.lachaud@isae-superaero.fr ;

Résumé

L'utilisation croissante des matériaux composites tissés 3D, notamment dans les structures primaires d'avions, nécessite une bonne compréhension de leurs mécanismes de rupture et l'utilisation d'outils adaptés à leur description. Ces matériaux peuvent présenter un haut niveau de complexité (hétérogénéité, forte anisotropie, influence de la structure locale, multiples mécanismes d'endommagement etc.) et la modélisation de leur comportement, et notamment la transition endommagement-rupture, doit donc faire l'objet d'une attention particulière.

Du fait de la taille importante de leur architecture au regard des dimensions des éprouvettes classiquement utilisées, les composites tissés 3D exhibent une dépendance à la taille et à la forme des champs mécaniques en pointe de fissure lors de la propagation de celle-ci [1]. Cette dépendance remet en cause l'utilisation de la mécanique linéaire élastique de la rupture et les inclue dans le cadre général des modèles à longueurs internes, lesquelles sont à mettre en relation avec la taille caractéristique des mécanismes de rupture observés.

Les modèles d'endommagement continus sont largement utilisés pour décrire le comportement des composites tissés 3D du fait de la présence au sein de ceux-ci de nombreux endommagements diffus. La transition vers la rupture est alors introduite par un comportement adoucissant une fois la limite de contrainte atteinte. Cet adoucissement est la cause d'une perte de robustesse des simulations du fait de la perte d'unicité des solutions continues et l'apparition d'une localisation de l'endommagement [3, 4].

Différentes méthodes de régularisation ont été introduites pour palier ces problèmes, parmi lesquelles les méthodes Crack-Band [2], effet retard [4] ou méthodes à gradient [5]. Ces méthodes sont usuellement introduites sur la base de constats mathématiques afin de ramener l'adoucissement à un problème bien posé. Les paramètres introduits sont considérés comme numériques et leur valeur peut être dépendante du problème. Ce travail cherche au contraire à analyser l'influence de ces méthodes en termes mécaniques notamment à travers l'étude de l'effet d'échelle découlant de leur utilisation.

Cet effet d'échelle est analysé au travers des lois de similitudes, *i.e.* l'évolution des valeurs mécaniques à rupture (force/déplacement F_C et d_C ou taux de restitution d'énergie critique G_C) en fonction de la taille W pour des éprouvettes homothétiques. Deux lois de similitude sont classiquement rencontrées lors de l'utilisation de modèles de rupture [2] :

- Les modèles reposant sur une contrainte (critère en contrainte, plasticité, endommagement) exhibent une évolution en W de la courbe F_C / d_C avec la taille de l'éprouvette
- Les modèles reposant sur un G_C dissipé (Mécanique Linéaire Élastique de la rupture) exhibent une évolution en \sqrt{W} de la courbe F_C / d_C avec la taille de l'éprouvette

Enfin, certains matériaux possèdent un comportement de transition entre les deux lois lorsque la taille de leur micro-structure n'est pas négligeable devant la taille de la structure. C'est le cas des matériaux tissés 3D et une méthode de régularisation adaptée à leur description devra ainsi pouvoir retranscrire cet effet.

La réalisation de simulations numériques sur des géométries homothétiques au moyen de différentes méthodes de régularisation permet de mettre en évidence les lois de similitudes suivantes.

- Pour les modèles de type Crack Band, la loi de similitude est conforme à celle attendue dans le cadre de la MLER tant que l'endommagement se concentre sur une unique bande d'éléments. Ce comportement n'est pas adapté à la description des tissés 3D pour lesquels l'influence de la micro-structure ne peut pas être négligée.
- Pour les modèles de type Effet-Retard, la loi de similitude est similaire à celle des modèles en contrainte (Fig. 1 (a)) et est donc non-conforme avec celle observée dans les composites tissés 3D dans le cadre quasi-statique.

- Pour les modèles à longueurs internes, la loi de similitude possède le comportement de transition recherché, en particulier pour les modèles de type Phase-Field [5] (Fig. 1 (b)). De plus, l'introduction de longueurs au sein du modèle peut s'apparenter à l'utilisation de longueurs internes matérielles dans les lois de similitudes utilisées pour les composites tissés 3D. Ces longueurs, reliées aux tailles caractéristiques des mécanismes de fissuration, sont identifiables sur le matériau et une correspondance peut-être réalisée entre les deux formalismes.

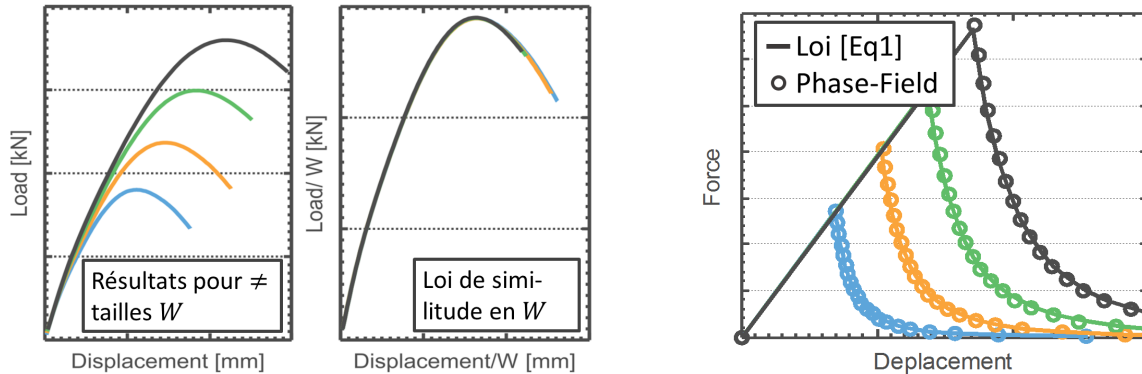


FIGURE 1 – Effet d'échelle pour une régularisation par (a) Effet Retard et (b) Phase-Field sur éprouvettes Compact Tension (tailles homothétiques de facteur 1, 1.5, 2 et 2.5)

Ainsi, l'étude des lois de similitudes obtenues par différentes méthodes de régularisation couplées à modèles d'adoucissement permet de dégager plusieurs familles de comportements. Certaines méthodes, parmi lesquelles les méthodes Crack-Band ou Effet Retard, n'ont pas permis de reproduire le bon type de comportement dans le cadre de simulations quasi-statiques pour la description de composites tissés 3D. Les modèles Phase-Field permettent quant à eux de simuler la propagation de fissure dans ces matériaux. Ces modèles introduisent des longueurs internes qui peuvent être assimilée à celle identifiées sur le matériau et prennent ainsi un sens physique.

Mots-clés : Composite tissé 3D ; rupture de torons ; régularisation ; effet d'échelle.

Remerciements

Cette étude a été menée dans le cadre du PRC MECACOMP, projet co-financé par la DGAC et le groupe Safran et impliquant Safran, l'Onera et le CNRS.

Références

- [1] V. Medeau et al. Experimental characterization of macro-cracks propagation in 3D woven composites and size effect *18th European Conference on Composite Materials*, Athènes, Grèce (2018)
- [2] Z.P. Bazant, J. Planas. *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*. CRC Press, (1997).
- [3] R. De Borst, L.J. Sluys Fundamental issues in finite element analyses of localization of deformation. *EComputations*, 10 (1993) 99-121
- [4] J.-F. Deü Rupture des composites stratifiés sous chargement dynamique : apports des méso-modèles avec endommagement retardé. Thèse, ENS Cachan, 1997.
- [5] C. Miehe et al. Phase field modeling of fracture in porous plasticity. *CMAME*, 312 (2016) 3-50