

# PRÉVISION DE L'ENDOMMAGEMENT DE STRUCTURES COMPOSITES STRATIFIÉES EN PRÉSENCE DE SINGULARITÉS GÉOMÉTRIQUES

J. Germain<sup>a</sup>, J. Rannou<sup>a</sup>, F. Laurin<sup>a</sup>, M. Dragon-Louiset<sup>b</sup>, F. Congourdeau<sup>b</sup>

a. ONERA/DMAS - Université Paris Saclay, jeremy.germain@onera.fr,  
johann.rannou@onera.fr, frederic.laurin@onera.fr

b. Dassault Aviation, marta.dragon-louiset@dassault-aviation.com,  
fabrice.congourdeau@dassault-aviation.com

**Mots clés :** endommagement, composites stratifiés, plaques trouées

## Résumé

*La modélisation de l'endommagement et de la rupture des matériaux composites, et plus particulièrement des stratifiés d'unidirectionnels carbone/époxy, est à l'origine de nombreux travaux au sein de la communauté scientifique. Les difficultés numériques inhérentes aux modèles à haute-fidélité et la complexité de leur procédure d'identification rendent ces outils difficiles à transférer vers des partenaires industriels. Un modèle de complexité maîtrisée dont les variables d'endommagement correspondent à des quantités observables est proposé dans cet article et validé au travers de nombreuses comparaisons essais/calculs sur différents stratifiés.*

## 1. Introduction

Le dimensionnement des structures composites stratifiées repose usuellement sur des critères établis en bureau d'études, à l'aide d'une vaste campagne d'essais sur différentes configurations de plaques. Le domaine de validité de ces critères se trouve être limité au voisinage des configurations testées en terme de géométrie et de drapage. Plusieurs modèles d'endommagement ont déjà été proposés dans les laboratoires de recherche [1,2] dans le but de proposer des outils permettant la rationalisation des campagnes d'essais, la réduction des coûts et la limitation du temps de développement des structures composites. Néanmoins, la complexité des procédures d'identification de ces approches, leur manque de robustesse ainsi que le manque de validation sur des configurations industrielles limitent leur transfert vers l'industrie. C'est dans ce contexte que l'ONERA et Dassault Aviation ont lancé en 2016 le projet de recherche MARCOS, financé par la DGAC. L'objectif de cet article est de présenter un modèle d'endommagement continu à bases physiques dédié à la prévision des endommagements au sein de plaques perforées, ainsi que la stratégie de modélisation adoptée pour valider cette approche.

## 2. Modèle d'endommagement continu

Un modèle d'endommagement continu formulé à l'échelle du pli tout en se reposant sur des bases physiques est proposé. Il se base sur l'approche ONERA proposée dans le WWFE-III [2] et correspond à une loi viscoélastique non-linéaire endommageable. La complexité de l'approche a volontairement été limitée pour proposer un modèle robuste et pouvoir l'identifier plus simplement vis à vis du

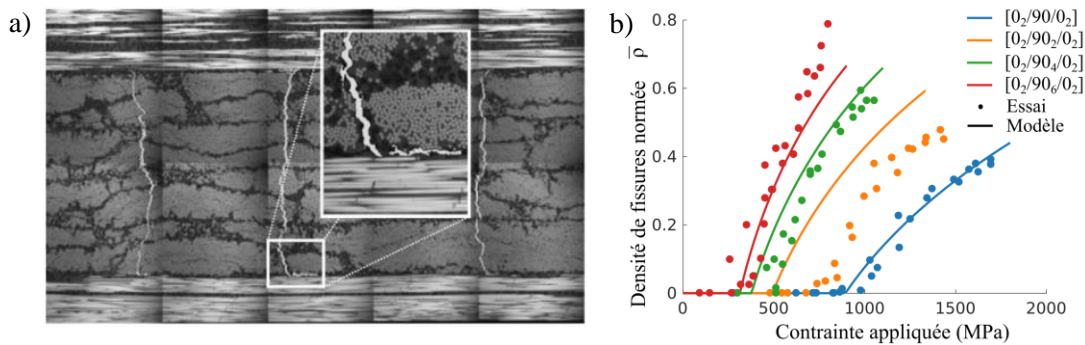
modèle déjà proposé. La loi de comportement est donnée par l'équation (1) où  $\underline{\sigma}$  représente la contrainte,  $\underline{\tilde{C}}$  la rigidité effective,  $\underline{\varepsilon}_{ve}$  les déformations visqueuses et  $\underline{\varepsilon}_{th}$  les déformations thermiques.

$$\underline{\sigma} = \underline{\tilde{C}} : (\underline{\varepsilon} - \underline{\varepsilon}_{ve} - \underline{\varepsilon}_{th}) \quad (1)$$

Une des particularités de cette approche réside dans le choix des variables d'endommagement :  $\rho$  et  $\mu$ . Elles représentent respectivement la densité de fissures dans le pli ainsi que le micro-délaminage en pointe de fissure, comme observé dans la Fig. 1a. Par la suite, les quantités adimensionnées  $\bar{\rho}$  et  $\bar{\mu}$  définies par l'équation (2) seront utilisées, où  $h$  correspond à l'épaisseur du pli et  $L$  à la distance moyenne séparant les fissures.

$$\begin{cases} \bar{\rho} &= \rho h \\ \bar{\mu} &= \frac{\mu}{L} \end{cases} \quad (2)$$

La présence de fissuration transverse et de micro-délaminage peut être observée en réalisant un suivi optique sur la tranche d'éprouvettes. Ces observations permettent de détecter précisément le seuil d'apparition des premières fissures mais aussi la cinétique d'endommagement, correspondant à l'évolution de leur nombre.



**Figure 1.a)** Fissuration transverse et micro-délaminage en pointe de fissure [3] **b)** Évolution de la densité de fissures normée pour différents stratifiés  $[0/90_n]_s$

La force motrice de l'endommagement, notée  $Y$ , ainsi que les lois d'évolution sont définies par l'équation (3) où  $\underline{\sigma}^+$  correspond à la partie positive du tenseur des contraintes dans lequel les composantes non-susceptibles de générer de la fissuration transverse sont nulles. Concernant les lois d'évolution de l'endommagement,  $Y_0$  correspond au seuil de l'endommagement, calculé en fonction de l'épaisseur de pli considéré. En effet, il a été observé expérimentalement que les résistances d'un pli ainsi que sa cinétique d'endommagement étaient dépendantes de son épaisseur [4,5].

$$Y = \frac{1}{2} \left( \sigma_{22}^{+2} S_{22}^0 + a_{24} \tau_{23}^{+2} S_{44}^0 + a_{26} \tau_{12}^{+2} S_{66}^0 \right) \begin{cases} \bar{\rho} &= (1 - \bar{\mu}) h \alpha \langle Y - Y_0 \rangle_+^p \\ \bar{\mu} &= \langle a_h \bar{\rho}^2 + b_h h \bar{\rho} \rangle_+ \end{cases} \quad (3)$$

Les coefficients  $\alpha$ ,  $p$ ,  $a_h$  et  $b_h$  sont des paramètres relatifs aux cinétiques d'endommagement. Un couplage entre la densité de fissures normée et le taux de micro-délaminage est volontairement introduit dans les lois d'évolution pour obtenir une saturation de la densité de fissures normée, observée expérimentalement, en particulier pour les stratifiés verre/époxy.

Ensuite, la diminution progressive des propriétés élastiques s'opère par le biais de tenseurs d'effets venant modifier la souplesse initiale  $\underline{S}_0$ , comme définie par l'équation (4). Ces tenseurs sont

diagonaux, définis positifs et leur identification est effectuée par calculs éléments-finis sur des cellules périodiques [0/90/0], où différents niveaux de densité de fissures normée et de taux de micro-délaminage sont modélisés de manière discrète dans le pli à 90°. La longueur de ces cellules est imposée par le niveau de densité de fissures modélisé. Pour ce niveau fixé, un délaminage de part et d'autre de la fissure est introduit sur une longueur calculée grâce à l'équation (3).

$$\tilde{S} = \tilde{S}_0 + \tilde{H}_{meso} = \tilde{S}_0 + \bar{\rho} \tilde{H}_A + \frac{\bar{\mu}}{1 - \bar{\mu}} \tilde{H}_B + \frac{\bar{\rho}^2}{1 - \bar{\mu}} \tilde{H}_C \quad (4)$$

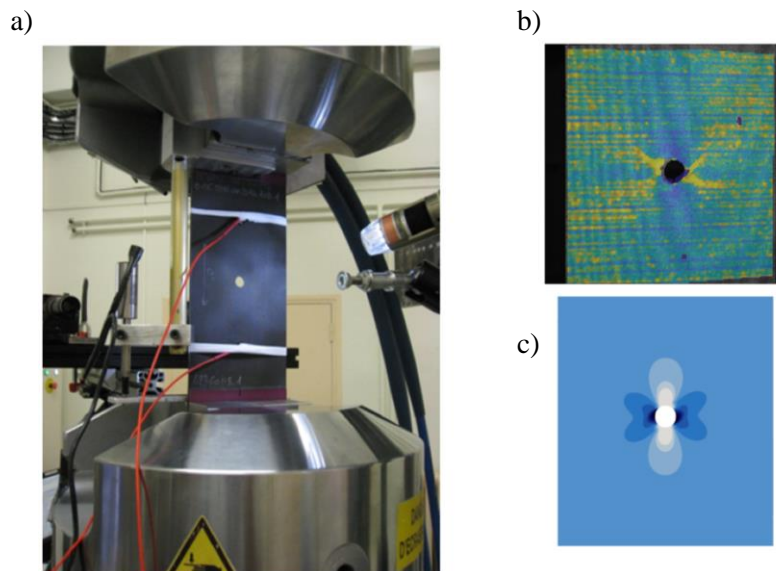
En plus de l'endommagement, une loi viscoélastique non-linéaire est utilisée dans le modèle [6]. Cette loi permet de prendre en compte les effets de vitesses et les non-linéarités observées sur le comportement, en particulier pour des chargements en cisaillement.

Ce modèle a été identifié sur le matériau T700GC/M21 grâce à la base d'essais disponibles à l'ONERA, la Fig. 1b illustre l'évolution de la densité de fissure normée en fonction de la contrainte appliquée sur différents stratifiés. Par ailleurs, ce modèle est en cours d'identification sur un matériau de dernière génération, pour lequel des essais ont spécifiquement été réalisés.

### 3. Modélisation éléments-finis et validation

Ce modèle a été implémenté dans le code de calcul à résolution implicite *Z-Set*, co-développé par l'ONERA et MINES PARISTECH. Une attention particulière a été portée au calcul de la matrice tangente (non-symétrique) du problème, afin de limiter les temps de calcul en résolution implicite.

La stratégie de modélisation choisie consiste à représenter chaque pli par des éléments volumiques, auxquels la loi de comportement présentée est assignée. Par ailleurs, l'ajout d'éléments d'interface entre chaque pli et l'utilisation d'un modèle de zone cohésive permet de modéliser l'amorçage et la propagation du délaminage.



**Figure 2.a)** Montage expérimental des essais sur plaques perforées  
**b)** Erreur de corrélation d'images numériques pouvant permettre la détection de fissures  
**c)** Prédiction de l'endommagement au sein d'une plaque perforée fortement désorientée

La validation de l'approche proposée est en cours de réalisation au travers de la comparaison sur une base d'essai composée de multiples configurations de plaques perforées, représentatives de celles

utilisées dans l'industrie, et où différents diamètres de trou, différentes largeurs de plaque et différents drapages ont été utilisés. Cette vaste campagne d'essais, dont le dispositif expérimental est illustré par la Fig. 2a, est en cours de réalisation et bénéficie d'une instrumentation riche constituée de la stéréo corrélation d'images numériques Fig. 2b, de l'émission acoustique et dans certains cas de tomographie-X. Ces différents moyens de mesure permettent de détecter précisément l'apparition ainsi que l'extension des dégradations au sein des plaques testées. Les premières comparaisons de l'approche proposée, illustrées par les Fig. 2b et Fig. 2c, montrent que la répartition des endommagements en surface est qualitativement bien reproduite par le modèle d'endommagement proposé.

## 4. Conclusion

Pour prévoir l'endommagement au sein de plaques perforées représentatives des configurations industrielles, un modèle d'endommagement pour les composites stratifiés carbone/époxy est proposé. Ce modèle de comportement viscoélastique non-linéaire endommageable se base sur l'approche précédemment proposée par l'ONERA. Un travail conséquent de simplification a été entrepris pour proposer une approche de complexité maîtrisée et permettre une identification plus aisée. Les variables d'endommagement du modèle sont des quantités observables, à savoir la densité de fissures et le micro-délaminage en pointe de fissure. Les effets de ces endommagements sur le comportement sont pris en compte grâce aux tenseurs d'effet, établis numériquement.

Ce modèle est actuellement en cours de validation sur des cas test de plaques perforées représentatives des configurations industrielles sur un matériau de dernière génération. Les premières comparaisons essais/calculs montrent que les faciès d'endommagement sont qualitativement bien décrits lors des simulations.

## Remerciements

Les auteurs remercient la DGAC (Direction Générale de l'Aviation Civile) pour le financement du projet MARCOS.

## Références

- [1] E. Abisset. Un mésomodèle d'endommagement des composites stratifiés pour le virtual testing : identification et validation. Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure de Cachan, 2012.
- [2] Laurin, F., Carrere, N., Huchette, C., and Maire, J. F. A multiscale hybrid approach for damage and final failure predictions of composite structures. *Journal of Composite Materials*, 47(20-21), 2713-2747, 2013.
- [3] Huchette, C., Sur la complémentarité des approches expérimentales et numériques pour la modélisation des mécanismes d'endommagement des composites stratifiés. Thèse de doctorat de l'Université Paris 6, 2005.
- [4] Parvizi, A and Garrett, KW and Bailey, JE Constrained cracking in glass fibre-reinforced epoxy cross-ply laminates. *Journal of Materials Science*, 13 (1978) 195-201.
- [5] Chang, Fu-Kuo and Chen, Ming-Huei The in situ ply shear strength distributions in graphite/epoxy laminated composites. *Journal of Composite Materials*, 21 (1987) 708-733.
- [6] Schieffer, A., Modélisation multiéchelle du comportement mécanique des composites à matrice organique et effets du vieillissement thermique. Thèse de doctorat de l'Université de technologie de Troyes, 2003.