

# Analyse des plaques composites fissurées et vieilles en conditions hygrothermiques

TAHAR REZOUG<sup>1,a</sup>, AMINA BENKHEDDA<sup>1</sup>, MOHAMED KHODJET-KESBA<sup>1</sup>  
ET EL ABBÈS BEDIA ADDA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Sciences Aéronautiques, Département d'aéronautique de Blida, Université Saad Dahlab de Blida, 09130 Blida, Algérie

<sup>2</sup> Laboratoire de Matériaux et Hydrologie, Université de Sidi Bel Abbés, Algérie

Reçu le 25 mars 2011, accepté le 29 juin 2011

**Résumé** – Cet article concerne les composites stratifiés croisés constitués de plis unidirectionnels. Ces stratifiés ont été vieillis en conditions hygrothermiques par des conditions d'environnement variables. En effet les propriétés mécaniques des stratifiés sont affectées par les variations de la température et de l'humidité. Lorsque des stratifiés croisés sont soumis à des sollicitations de traction quasi-statiques, le premier type d'endommagement qui apparaît est la fissuration transversale des couches orientées à 90°. La présence de ce type de fissures entraîne une diminution de la rigidité des stratifiés. Dans cet article, un modèle analytique fondé sur la diffusion du cisaillement a été modifié pour évaluer la perte de rigidité des stratifiés engendrée par le vieillissement hygrothermique avec la variation transitoire de la concentration en fonction de la densité de fissures. Les résultats de cet article démontrent clairement la dépendance de la dégradation des propriétés élastiques en fonction de la densité de fissuration et des conditions environnementales.

**Mots clés** : Microfissurations / rigidité / vieillissement / hygrothermie

**Abstract – Analysis of the composite patches cracked and aged in hygrothermal conditions.** This paper deals with cross-laminated composites consisting of unidirectional plies. These laminates were hygrothermally aging by variable environmental conditions. Indeed, the mechanical properties of laminates will be affected by the temperature and the humidity changes. When these cross laminates are subjected to quasi-static tensile stresses, the first type of damage that appears is the transverse cracking of the layers oriented at 90° reducing the laminates stiffness. In this paper, an analytical model based on the diffusion of shear was modified to evaluate the loss of rigidity caused by the laminates with hygrothermal aging the transient variation of the concentration depending on the density of cracks. The results clearly demonstrate the dependence of the degradation of elastic properties as a function of crack density and environmental conditions.

**Key words**: Microfissuring / rigidity / ageing / hydrothermal

## 1 Introduction

Lors d'une sollicitation en traction monotone ou cyclique, la dégradation de matériaux homogènes et isotropes est généralement localisée et évolue selon trois étapes : l'amorçage, la propagation d'une fissure principale et la ruine finale. Kim et al. [1] considèrent l'effet de température sur la propagation des fissures spécialement dans les polymères, alors que Kim [2] a étudié antérieurement l'effet de température et d'humidité sur un système graphite/époxy Thornel 300/Namco 5208. De même Naitali et al. [11] se sont intéressés à la

modélisation thermomécanique des dépôts de zircon obtenus par projection plasma sur un substrat en acier inoxydable.

Dans le domaine de l'aéronautique, des essais expérimentaux [4] ont montré que les conditions de vol, ont une influence sur le processus d'absorption de l'humidité par les composites. Il n'est pas judicieux de dissocier l'influence de la température et de l'humidité en tant que phénomènes physiques et mécaniques. Springer [5] a déterminé la quantité d'humidité en fonction du temps, lorsque le matériau est exposé à une atmosphère humide, ou immergé dans l'eau et à température constante (taux d'humidité variant de 0 à 100 %).

<sup>a</sup> Auteur pour correspondance : trezoug@yahoo.fr

## Nomenclature

$E_{fx}$	Module de Young longitudinal dans la direction de la fibre
$E_{fy}$	Module de Young transversal dans la direction de la fibre
$E_m$	Module de Young de la matrice
$\nu_{fx}$	Coefficient de Poisson dans la direction de la fibre
$\nu_m$	Coefficient de Poisson dans la direction de la matrice
$G_{fx}$	Module de cisaillement dans la direction de la fibre
$G_m$	Module de cisaillement dans la direction de la matrice
$V_f$	Volume des fibres
$E_x$	Module de Young longitudinal dans le pli fissuré
$E_{x0}$	Module de Young longitudinal dans le pli non fissuré
$E_0$	Module de Young dans le pli à $0^\circ$
$E_{90}$	Module de Young dans le pli à $90^\circ$
$G_{12}$	Module de cisaillement longitudinal
$G_{23}$	Module de cisaillement transversal
$\nu_{12}$	Coefficient de Poisson longitudinal
$\nu_{23}$	Coefficient de Poisson transversal
$\nu_{xy}^0$	Coefficient de Poisson longitudinal dans la couche à $0^\circ$
$t_0$	Épaisseur des couches à $0^\circ$
$t_{90}$	Épaisseur des couches à $90^\circ$
$n$	Nombre de couches à $90^\circ$
$m$	Nombre de couches à $0^\circ$
$S_{ij}$	Élément de la matrice de souplesse ( $i = 1, 2, 3$ $j = 1, 2, 3$ )
$\varepsilon_i^0$	Déformation dans les couches à $0^\circ$ ( $i = x, y, z$ )
$\varepsilon_i^{90}$	Déformation dans les couches à $90^\circ$ ( $i = x, y, z$ )
$\sigma_i^0$	Contraintes dans les couches à $0^\circ$ ( $i = x, y, z$ )
$\sigma_i^{90}$	Contraintes dans les couches à $90^\circ$ ( $i = x, y, z$ )
$T_{op}$	Température d'opération
$t$	Temps

Amara et al. [6] ont étudié l'évolution de la fissuration transverse dans les stratifiés croisés vieillis car cette évolution et cet état de saturation des fissures transverses dépendent de plusieurs paramètres et entre autres les épaisseurs des couches, la nature du chargement et la séquence d'empilements. Ils ont constaté que les modèles analytiques proposés par de nombreux auteurs [7], permettent la détermination du module longitudinal du stratifié endommagé en fonction de la densité de fissures.

La fonction de perturbation de contrainte a été modifiée pour évaluer la perte de rigidité des stratifiés selon deux évolutions, l'une est une variation parabolique complète du déplacement supposé dans les couches  $90^\circ$  et  $0^\circ$  et l'autre est un cisaillement progressif dans la couche à  $0^\circ$ . Ces derniers ont été comparés avec le modèle de Hashin [8]. Le vieillissement hygrothermique a été pris en considération dans le cas d'une variation de concentration transitoire pour le cas de désorption.

## 2 Modélisation analytique

Soit un stratifié croisé symétrique de type  $[0_m/90_n]_s$ , soumis à une traction uni axiale  $\sigma_c$  suivant l'axe  $x$ . Cette charge provoque l'apparition puis la démultiplication des fissures dans la couche à  $90^\circ$  (Fig. 1). Les fissures

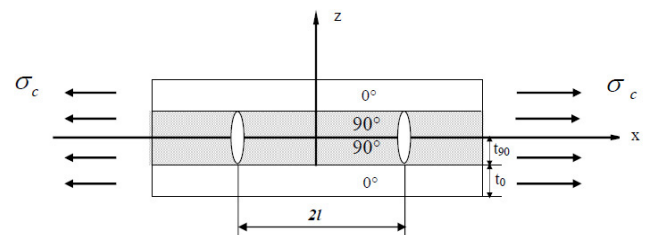


Fig. 1. Fissuration transverse et cellule élémentaire.

s'étendent sur toute la largeur de l'éprouvette, et elles sont uniformément réparties le long de l'axe de traction (même espacement entre fissures consécutives). Ainsi le stratifié endommagé est un empilement de cellules élémentaires suivant l'axe  $x$ .

Les équations liant les déformations et les contraintes sont [9] :

(a) Dans la couche  $0^\circ$  :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_z^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x^0 \\ \sigma_y^0 \\ \sigma_z^0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{xy}^0 = s_{66}\sigma_{xy}^0; \varepsilon_{xz}^0 = s_{55}\sigma_{xz}^0; \varepsilon_{yz}^0 = s_{44}\sigma_{yz}^0 \quad (2)$$

**Tableau 1.** Propriétés élastiques du matériau composite AS4-3502 [9].

Propriétés matériau	$E_0$ (GPa)	$E_{90}$ (GPa)	$G_{12}$ (GPa)	$G_{23}$ (GPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{23}$	$h_0$ (mm)
AS4-3502	144,8	9,58	4,79	4,2	0,31	0,40	0,127

(b) Dans la couche  $90^\circ$  :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^{90} \\ \varepsilon_y^{90} \\ \varepsilon_z^{90} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{22} & S_{12} & S_{23} \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} \\ S_{23} & S_{12} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x^{90} \\ \sigma_y^{90} \\ \sigma_z^{90} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{xy}^{90} = s_{66}\sigma_{xy}^{90}; \quad \varepsilon_{xz}^{90} = s_{55}\sigma_{xz}^{90}; \quad \varepsilon_{yz}^{90} = s_{66}\sigma_{yz}^{90} \quad (4)$$

où  $S_{ij}$  sont les éléments de la matrice de souplesse pour un composite unidirectionnel. Nous obtenons ainsi l'expression de la réduction du module longitudinal du stratifié due aux fissures transverses, comme suit.

$$\frac{E_x}{E_{x0}} = \left( \frac{E_{90}t_{90}}{E_0t_0} \frac{(1 - \nu_{12}\nu_{xy}^0)}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \frac{1}{2a} \times R(a) \left( 1 + \nu_{xy}^0 \frac{(s_{12}t_{90} + s_{12}t_0)}{(s_{22}t_{90} + s_{11}t_0)} \right) \right)^{-1} \quad (5)$$

### 3 Résultats et validations

Cette étude s'applique aux structures composites alternées et fissurées. Au cours de leur usage ces structures sont soumises à des sollicitations variables dans le temps qui augmentent la densité de fissures en fragilisant et en réduisant la rigidité de cette structure.

Dans le cas étudié les sollicitations variables sont de natures hygrothermiques à savoir une température et une humidité variables dans le temps.

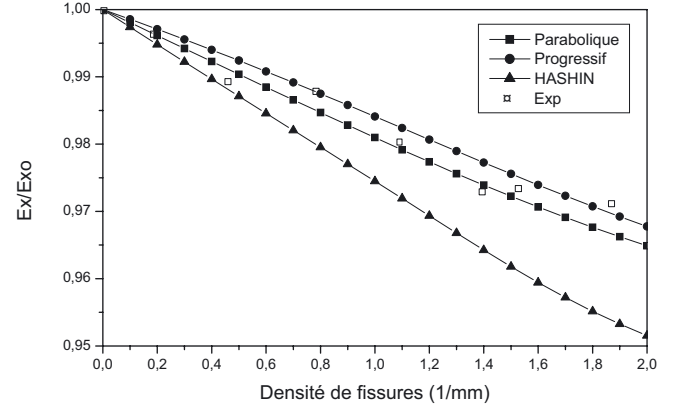
#### 3.1 Réduction du module de Young longitudinal

La simulation numérique est effectuée pour le composite époxyde 3502 fibre de carbone AS4 dont les propriétés élastiques sont résumées dans le tableau 1.

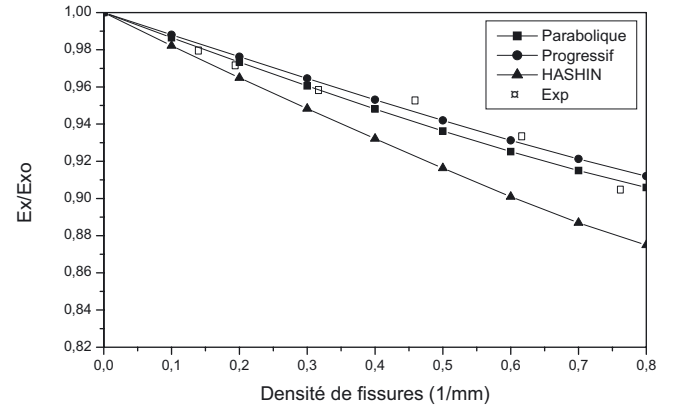
Les résultats montrent que lorsque les fissures transverses apparaissent, le module de Young longitudinal est diminué et la meilleure prédiction comparative des résultats expérimentaux est donnée par les modèles parabolique et progressif. Le modèle variationnel de Hashin prévoit des diminutions supérieures à celles obtenues par les essais expérimentaux [8–10].

#### 3.2 Influence des conditions hygrothermiques sur la perte de rigidité

Dans cette partie, la perte de la rigidité relative du stratifié croisé qui a été déjà soumis initialement à un vieillissement hygrothermique est calculée. La diminution



**Fig. 2.** Diminution du module de Young en fonction de la densité de fissures  $[0/90]_S$  AS/3502 comparé à différents modèle.



**Fig. 3.** Diminution du module de Young en fonction de la densité de fissures  $[0/90_3]_S$  AS/3502, comparé à différents modèles.

de rigidité du stratifié due à la densité de fissuration est évaluée par rapport à la rigidité initiale du stratifié non endommagé soumis aux mêmes conditions d'environnement.

Tsai [11] propose pour le graphite époxyde (T300/5208) une température adimensionnelle  $T^*$ , qui est un paramètre essentiel dans l'évaluation des caractéristiques hygrothermiques du matériau composite. L'application de cette étude est faite sur le T300/5208. Nous présentons ci-dessous sous forme de tableaux les caractéristiques de ce type de matériau, ainsi que les caractéristiques de la matrice époxyde et des fibres de carbone.

La figure 4 montre clairement que la diminution du module dépend outre de la densité de fissuration, de l'humidité et de la température. Ainsi pour des densités de fissuration inférieures à l'unité une diminution de la rigidité relative plus importante est obtenue et pour des températures plus élevées la diminution est moindre.

Tableau 2. Caractéristiques de fibres et matrice du T300/5208 [11].

$E_{tx}$ (Gpa)	$E_{ty}$ (Gpa)	$\nu_{tx}$	$E_m$ (Gpa)	$\nu_m$	$G_m$ (Gpa)	$G_{fx}$ (Gpa)	$V_f$
259	18,69	0,25	3,4	0,35	1,26	19,69	0,7

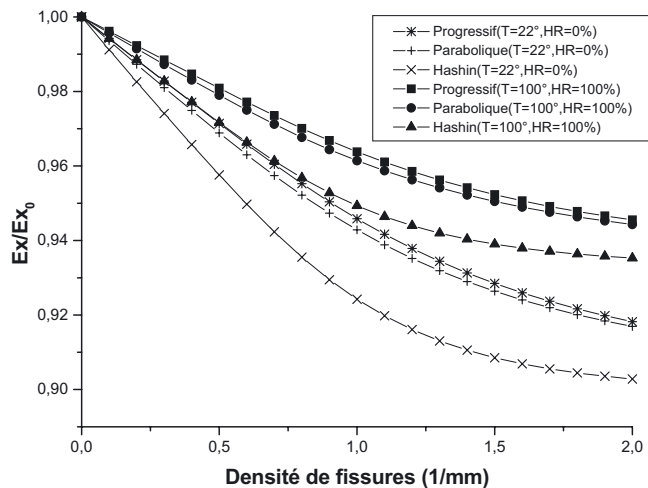


Fig. 4. Diminution du module de Young en fonction de la densité de fissures  $[0/90_3]_S$  T300/5208 avec  $t = 4222$  h et Top = 22 °C, Top = 1000 °C selon différents modèles, (Top = 22 °C, HR = 0 %) et (Top = 100 °C, HR = 100 %).

Notons aussi que les deux modèles parabolique et progressif conduisent au même résultat comparativement au modèle de Hashin [12].

## 4 Conclusion

L'initiation, l'évolution et l'état de saturation des fissures transverses dépendent de plusieurs paramètres qui sont les épaisseurs des couches, la nature de la charge et la séquence d'empilement. Nous constatons que les modèles analytiques proposés par de nombreux auteurs, pour déterminer le module longitudinal du stratifié endommagé en fonction de la densité de fissures, supposent, en général, des hypothèses restrictives sur le champ de contraintes.

Cette étude cible aussi l'analyse des fissures transverses dans les stratifiés croisés vieillis. Les propriétés mécaniques de ces matériaux sont affectées par les variations de température et d'humidité. Par conséquent, la perte de rigidité due aux fissures transverses et aussi affectée par les conditions d'environnement.

En outre le module de Young longitudinal diminue en fonction de la densité de fissures lorsque le nombre de couches à 90° est plus important que le nombre de couches à 0°. La structure perd donc davantage de rigidité longitudinale.

En perspective de cette étude, il sera intéressant d'évaluer comment la sollicitation transversale d'une part et l'évolution de la rigidité transversale d'autre part, modifient la densité des fissures.

L'identification des fissures peut aussi être étudiée en utilisant une méthode inverse de conduction de la chaleur par estimation des flux thermiques, Bauzin [11,12]. Effectivement les zones à faible flux témoignent de l'existence d'une fissure. Un suivi de l'évolution des fissures au cours du temps peut être réalisé par cette technique.

## Références

- [1] H.S. Kim, X.M. Wang, N.A.H Nik Abdudulah, Effect of temperature on fatigue crack growth in the polymer ABS, *J. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 17 (1994) 361–367
- [2] R.Y. Kim, Effect of temperature and moisture on pin bearing strength of composite laminates, *J. Compos. Mater.* 10 (1976) 149–155
- [3] B. Naitali, F. Hugot, M. El Ganaoui, Numerical study of a regularization technique of thermomechanical constraints in depots found in plasma projection, *Mécanique & Industries* 11 (2010) 75–80
- [4] E.L. Mckague, J.R., J.E. Halkias, Reynolds, Moisture in composites : The effect of supersonic service on diffusion, *J. Compos. Mater.* 9 (1975) 2–9
- [5] C.H. Shen, G. Springer, Moisture absorption and desorption of composite materials, *J. Compos. Mater.* 10 (1976) 2–20
- [6] K. Amara, A. Tounsi, A. Megueni, E. Adda Bedia, Evolution de la fissuration transverse dans les stratifiés croisés vieillis, *Laboratoire des matériaux et hydrologie, Sidi bel Abbés*, 2003
- [7] K. Ogi, Y. Takao, Evolution of transverse cracking in CF/Epoxy cross-ply laminates under creep loading, *J. Reinf. Plast. Compos.* 18 (1999) 1546–1556
- [8] A. Tounsi, K.H. Amara, E.A. Adda-dedia, Analysis of transverse cracking and stiffness loss in cross-ply laminates with hygrothermal conditions, *Comput. Mater. Sci.* 32 (2005) 167–174
- [9] A. Tounsi, K. Amara, A. Benzair, A. Megueni, On the transverse cracking and stiffness degradation of aged angle-ply laminates, *Mater. Lett.* 60 (2006) 2561–2564
- [10] M. Bouazza, A. Tounsi, A. Benzair, E.A. Adda-dedia, Effect of transverse cracking on stiffness reduction of hygrothermal aged cross-ply laminates, *Materials and Design* 28 (2007) 1116–1123
- [11] S.W. Tsai, *Composite design, Think composite*, 4th edition, Dayton, 1988
- [12] J.G. Bauzin, N. Laraqi, A. Baïri, Estimation of thermal contact parameters at the interface of two sliding bodies, *J. Phys.: Conference Series* 135 (2008) 022015, DOI: 10.1088/1742-6596/135/1/012015
- [13] J.G. Bauzin, N. Laraqi, Simultaneous estimation of frictional heat flux and two thermal contact parameters for sliding contacts, *Numer. Heat Transf. A Appl.* 45 (2004) 313–328