

## Endommagement de composites stratifiés verre/epoxy sous chargements statique et de fatigue

Yannick Thollon & Christian Hochard

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique  
31 chemin J. Aiguier, 13402 Marseille cedex 20, France  
thollon@lma.cnrs-mrs.fr; hochard@lma.cnrs-mrs.fr

### Résumé :

*Cette étude traite de la modélisation du comportement à rupture de composites stratifiés constitués de plis tissés déséquilibrés verre/epoxy sous chargements statique et de fatigue.*

*Des essais de traction monotone puis cycliques sur des éprouvettes plates ont permis de décrire le comportement du matériau à l'échelle du pli. Les plis tissés déséquilibrés ont un comportement élasto-endommageable dans les directions chaîne et trame, et élasto-plastique endommageable en cisaillement. Deux types de ruptures peuvent être distingués: (i) Une rupture fragile qui correspond à une déformation maximale des fibres; (ii) une rupture par instabilité de la structure due à l'endommagement.*

*Le modèle, basé sur un endommagement cumulé, permet de décrire l'évolution de l'endommagement sous chargements statique et de fatigue. L'évolution de l'endommagement statique dépend du maximum du chargement et prend en compte les couplages entre traction et cisaillement. L'évolution de l'endommagement de fatigue dépend du maximum du chargement mais également de l'amplitude du chargement. Le domaine de validité de ce modèle se limite à la rupture du premier pli et ne décrit pas le délaminage.*

### Abstract :

*The objective of this work is to model the mechanical behaviour of unbalanced woven fabric composite under static and fatigue loads up to first failure.*

*Experimental tests show the behaviour of the unbalanced woven plies under different loads and the damages evolution. Small cracks parallel to the fibers are observed and lead to a loss of rigidity in warp, fill and shear directions. Two types of ruptures can be distinguished: (i) a brittle fracture which corresponds to a maximum strain of fibres; (ii) a rupture by instability of the structure due to high level damage.*

*A damage model based on the ply scale is proposed in order to predict the mechanical behaviour of unbalanced woven fabric composite up to first failure. The development of the damage depends on the maximum static load, the maximum cyclic loads and their amplitude. The field of validity of this model is limited to the rupture of the first ply and does not describe delamination.*

**Mots-clefs : composite stratifié; fatigue; endommagement**

### 1 Introduction

L'utilisation des plis tissés déséquilibrés pour la réalisation de composites stratifiés permet de combiner les avantages des plis unidirectionnels et des plis tissés équilibrés. Ils permettent d'optimiser l'orientation des fibres, de bloquer les fissures transverses tout en étant facilement manipulables. Cette étude traite de la modélisation du comportement à rupture de composites stratifiés constitués de plis tissés déséquilibrés verre/epoxy sous chargements statique et de fatigue.

Dans le cas des composites stratifiés, les mécanismes d'endommagement et de rupture sont nombreux (microfissuration de la matrice, décohésion fibre/matrice, rupture transverse, rupture de fibre, délaminage) et rendent complexe la modélisation aussi bien dans le cas de chargements monotones que pour des chargements cycliques (Reifsnider (1998), Taljera (1981)). Ces mécanismes de rupture peuvent être décrits à différentes échelles (échelle des stratifiés, échelle des plis, échelle des fibres...) à partir de différents types de modèles (critère de rupture, mécanique de l'endommagement, densité de fissures...)(Wang (1987)). Les modèles pour décrire les évolutions des endommagements dans le cas de chargements statiques monotones sont généralement différents des modèles utilisés pour décrire des chargements de fatigue (Jen (1998) Gao (1994)).

Dans ce travail, nous présentons un modèle de comportement unifié qui permet de décrire la rupture des composites stratifiés constitués de plis tissés déséquilibrés sous chargement statique et de fatigue.

## 2 Comportement mécanique des plis tissés déséquilibrés

### 2.1 Présentation du matériau

Le matériau composite stratifié présenté dans cette étude est constitué de plis tissés déséquilibrés verre/époxy (FIG. 1). Le renfort en verre E est un satin de cinq avec 83% de fibres dans la direction chaîne et 17% dans la trame. Les plis tissés déséquilibrés sont un compromis entre les plis UD et les plis tissés équilibrés: ils présentent une direction privilégiée tout en étant facilement manipulable grâce au tissage.

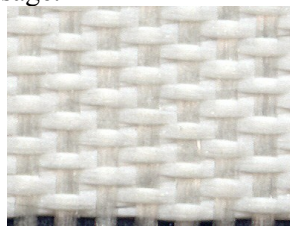


FIG. 1 – Pli tissé déséquilibré verre/époxy.

### 2.2 Comportement sous chargement statique

Les résultats des essais de tractions avec décharges sont présentés (FIG. 2).

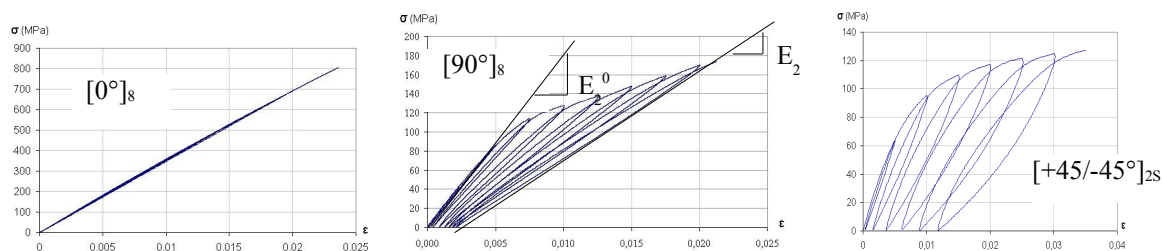


FIG. 2 Essais de tractions avec décharges respectivement en sens chaîne, trame et cisaillement.

On observe un comportement élasto-endommageable dans les directions chaîne et trame, et élasto-plastique endommageable en cisaillement. Sur ces essais de tractions avec décharges (FIG 2), on peut mesurer la perte de rigidité et ainsi observer l'évolution de l'endommagement en fonction du chargement (FIG 3). On constate alors deux cinétiques différentes : dans le sens chaîne et trame, l'endommagement se développe jusqu'à saturation du pli; en cisaillement on a un endommagement diffus qui se développe continuellement jusqu'à rupture du pli.

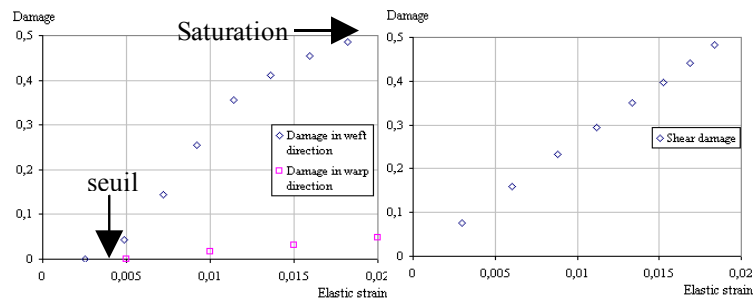


FIG. 3: Evolution de l'endommagement en fonction de la déformation élastique

Les phénomènes qui cause cet endommagement sont nombreux et complexes (Roy, (1998)),(Osada, (2003)). Néanmoins, les phénomènes prépondérants sont la décohésions fibres-matrice et la fissuration de la matrice. Afin d'observer le processus d'endommagement, on a réalisé des essais de traction sur des éprouvettes constituées d'un seul pli. En effet, les fibres de verres et la résine sont suffisamment transparentes pour laisser apparaître les fissures lorsque l'on place une forte source lumineuse derrière l'éprouvette. Des exemples d'images obtenues sont présentés FIG 4 et FIG 5. Ces fissures sont de l'ordre de quelques mm et inférieure à l'épaisseur du pli.

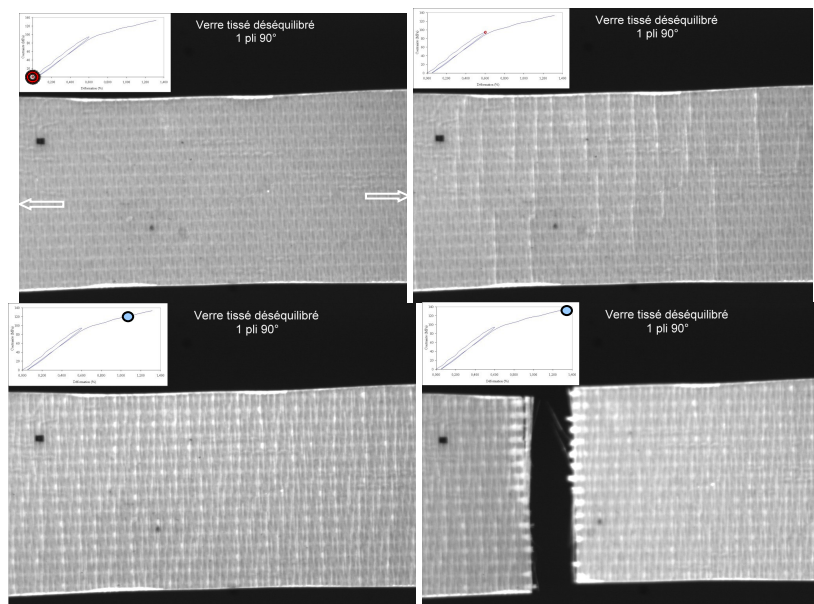


FIG. 4: Endommagement dans un pli orienté à 90°

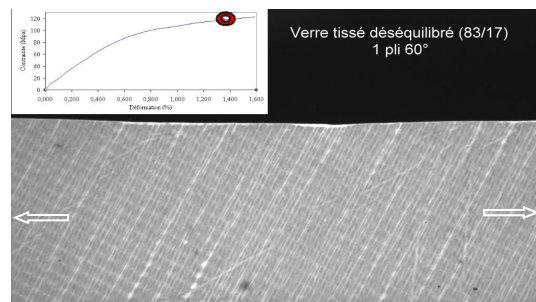


FIG 5. Endommagement parallèle au fibres dans un pli orienté à 60°

Ces images nous montrent que les fissures sont parallèles aux fibres, qu'elles apparaissent à partir d'un certain seuil, sont réparties dans tous le pli, et n'évoluent pas lors des décharges.

Au cours des essais, deux types de ruptures ont pu être distingués: (i) une rupture fragile qui correspond à une déformation maximale des fibres; (ii) une instabilité de la structure due à l'endommagement.

### 2.3 Comportement sous chargement de fatigue

Les essais de fatigues ont été réalisés sur des éprouvettes plates à une fréquence de 10Hz. Nous avons pu observer que la fatigue est due à l'évolution de l'endommagement, donc des micro-fissures, dans la structure. On peut voir sur la FIG 6, que le matériau présente une limite d'endurance à 30% de la charge statique maximale, ce qui correspond à la valeur seuil, pour un chargement statique, à l'apparition de l'endommagement. Cette valeur est la même dans le sens chaîne et dans le sens trame.

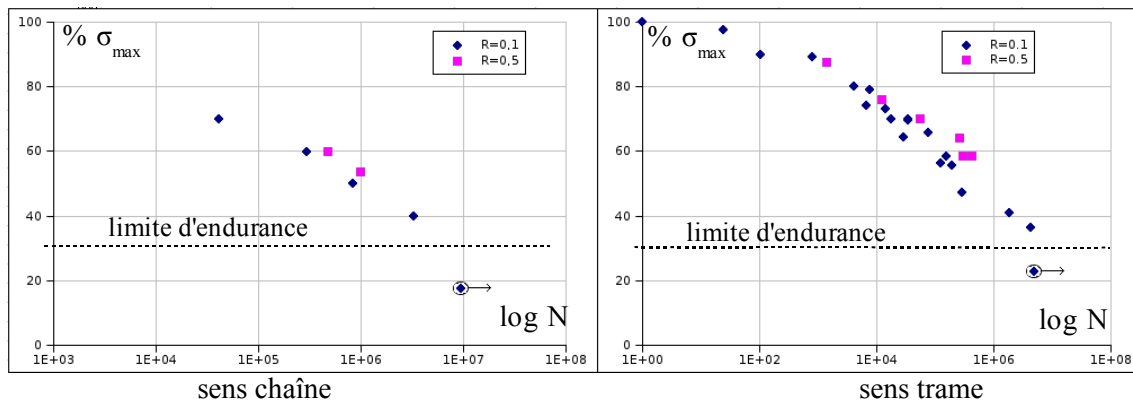


FIG 6. Courbes S-N

L'amplitude du chargement n'a qu'une faible influence sur la durée de vie des éprouvettes dans le sens chaîne et trame. Par contre, en cisaillement, la valeur de l'amplitude est aussi importante que la valeur maximale sur la durée de vie (Payan 2002)

### 3 Modèle

Le modèle est basé sur la mécanique de l'endommagement et utilise des variables internes qui permettent de décrire la chute progressive de rigidité du pli. L'évolution de ces variables d'endommagement dépend des chargements statiques monotone (Ladevèze (1992)) et cycliques (Payan (2002)). Les plis sont considérés comme homogènes et orthotropes, et l'endommagement constant dans l'épaisseur.

Les variables internes sont  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_{12}$ , respectivement endommagement dans les directions chaîne, trame et cisaillement, correspondent à la perte de rigidité de chaque pli.

$$\begin{aligned} E_1 &= E_1^0 (1 - d_1) \\ E_2 &= E_2^0 (1 - d_2) \\ G_{12} &= G_{12}^0 (1 - d_{12}) \end{aligned} \quad d_{1,2,12} \in [0,1]$$

$E_1^0$ ,  $E_2^0$  et  $G_{12}^0$  sont les rigidités initiales du matériau respectivement dans les directions chaîne, trame et cisaillement.

Sous l'hypothèse des contraintes planes, des petites perturbations et de la partition des déformations, on peut écrire l'énergie de déformation d'un pli en termes de contraintes :

$$E_D^{cp} = \frac{1}{2} \frac{\langle \sigma_1 \rangle_+^2}{E_1^0 (1-d_1)} + \frac{\langle \sigma_1 \rangle_-^2}{E_1^0} - 2 \frac{\nu_{12}^0}{E_1^0} \sigma_1 \sigma_2 + \frac{\langle \sigma_2 \rangle_+^2}{E_2^0 (1-d_2)} + \frac{\langle \sigma_2 \rangle_-^2}{E_2^0} + \frac{\sigma_{12}^2}{G_{12}^0 (1-d_{12})}$$

où  $\langle . \rangle_+$  correspond à la partie positive. Les énergies de traction et de compression sont dissociées afin de prendre en compte le caractère unilatéral d'ouverture et de fermeture des fissures. A partir de ce potentiel, on définit les forces thermodynamiques associées aux variables internes  $d_1$ ,  $d_2$  et  $d_{12}$ :

$$Yd_i = \frac{E_D^{cp}}{d_i} = \frac{\langle \sigma_i \rangle_+^2}{2E_i^0 (1-d_i)^2} \quad \text{pour } i=1,2,12$$

Les évolutions de ces variables d'endommagement dépendent des forces associées, et plus précisément de leurs valeurs maximales au cours de l'histoire du chargement. Afin de prendre en compte le couplage traction/cisaillement pour décrire l'évolution des endommagements, une force thermodynamique équivalente et sa valeur maximale au cours de l'histoire du chargement sont introduites :

$$Y_i = \sup_{\tau_i} [a_i (Yd_1)^n + b_i (Yd_2)^n + c_i (Yd_{12})^m] \quad \text{pour } i=1,2$$

où  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  sont les constantes de couplage entre traction et cisaillement.  
n et m sont des coefficients de la loi puissance.

### 3.1 Endommagement cumulé

L'évolution des variables d'endommagement  $d_1$ ,  $d_2$  et  $d_{12}$  dépend des chargements monotone et cyclique. On fait l'hypothèse d'un endommagement cumulé où l'endommagement total est égal à la somme d'un endommagement associé au chargement statique  $d^s$  et d'un endommagement associé au chargement de fatigue  $d^f$ .

$$d_1 = d_1^s + d_1^f; \quad d_2 = d_2^s + d_2^f; \quad d_{12} = d_{12}^s + d_{12}^f$$

Les évolutions dépendent des niveaux de chargements et d'endommagement et permettent de connaître l'ensemble des variables sur toute l'histoire du chargement.

#### *Evolution de l'endommagement statique*

Les lois d'évolutions de l'endommagement statique sont données par:

$$\begin{aligned} d_1 &= \langle \sqrt{Y_1} - \sqrt{Y^0} \rangle_+ \\ d_2 &= \langle \sqrt{Y_2} - \sqrt{Y^0} \rangle_+ \\ d_{12} &= \alpha_1 d_1 + \alpha_2 d_2 \end{aligned} \quad \text{pour } i=1,2$$

où  $Y^0$  correspondent au seuil à partir duquel l'endommagement se développe.

$\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  sont les termes de couplages entre l'endommagement dans la direction des fibres et en cisaillement.

#### *Évolution de l'endommagement de fatigue*

L'évolution de l'endommagement de fatigue va dépendre du niveau de chargement sur un cycle, mais également du niveau d'endommagement. Nous supposons que, comme pour l'endommagement statique, l'endommagement de fatigue dépend de la valeur maximale de la force associée équivalente  $Y$  sur un cycle. De plus, les essais montrent que l'évolution de l'endommagement de fatigue dépend également de l'amplitude du chargement. Nous choisissons

de définir cette amplitude par la différence entre les valeurs maximales et minimales de la force associée sur un cycle. Une loi d'évolution de l'endommagement de fatigue en fonction du nombre de cycle peut être définie ainsi (Payan 2002):

$$\frac{\partial d_i^f}{\partial N} = c \langle (\Delta Y_i)^\alpha (Y_i)^\beta - (Y_{of})^{\alpha+\beta} \rangle_+ \quad \text{pour } i=1,2 \text{ et } 12$$

avec  $\Delta Y = Y_{max} - Y_{min}$  sur le cycle et  $Y_{of}$  la limite d'endurance

Lors d'un chargement cyclique, l'évolution de l'endommagement de fatigue implique une croissance de l'endommagement cumulé et donc peut, par l'intermédiaire de la force équivalente  $Y$ , entraîner une évolution de l'endommagement statique. Si un chargement monotone est imposé après ce chargement cyclique, la continuité de l'endommagement est assurée.

#### 4 Conclusions

Les premiers résultats expérimentaux permettent de valider les hypothèses faites sur la partie fatigue du modèle envisagé. Des essais en plus grand nombre doivent permettre une détermination plus précise des coefficients qui définissent les dépendances par rapport à l'amplitude et la valeur maximale du chargement. Ce modèle se limite à la première rupture de pli, ce qui n'est pas pénalisant dans un contexte industriel où la sécurité est un critère prépondérant.

A terme, l'étude doit permettre non seulement de prédire le nombre de cycles à rupture mais aussi de connaître l'état du matériau à tout instant. Ceci permet d'envisager, dans un futur proche, d'intégrer ce comportement dans un code de calcul de type éléments finis pour simuler le comportement d'une structure composite stratifié sous chargements statique et de fatigue.

#### Références

- Reifsnider K., 1998 Durability and damage tolerance of fibrous composite systems, Handbook of composites, edited by S.T. Peters, n°35, 1998, pp.794-809.
- Taljera R., Fatigue of composite materials: damage mechanisms and fatigue life diagrams, Proc. R.Soc. Lond A378, 1981, pp.461-475
- Wang A.S.D., Strength, failure, and fatigue analysis of laminates, Engineered Materials Handbook, ASM, vol.1 1987 pp.236-251
- Jen M-H.R., Lee C-H., Strength and life in thermoplastic composite laminates under static and fatigue loads, Int. J. Fatigue, vol.19, 1998, pp.605-615
- Gao Z., A cumulative damage model for fatigue life of composite laminates, Journal of Reinforced Plastics and composites, vol.13, 1994, pp.128-141
- Roy A.K., "Comparison of in situ damage assessment in unbalanced fabric composite and model laminate of planar crimping", Composites Science and Technology, 58, 1998
- Osada T., Nakai A., Hamada H., "Initial fracture behavior of satin woven fabric composites", Composite structure 61, 2003
- Ladevèze P., Le Dantec E., "Damage modelling of the elementary ply for laminated composites", Composites Science and Technology 43, 1992 257-267
- Payan J., Hochard C., Damage modelling of carbon/epoxy laminated composites under static and fatigue loads, Int. Journal of Fatigue n°24, 2002, pp.299-306