

**Comportement à rupture dans le sens des fibres de FRP  
sous chargement statique et de fatigue = Behaviour  
until rupture of FRP in the fibre direction under static  
and fatigue loads**

Christian Hochard, Yannick Thollon

► **To cite this version:**

Christian Hochard, Yannick Thollon. Comportement à rupture dans le sens des fibres de FRP sous chargement statique et de fatigue = Behaviour until rupture of FRP in the fibre direction under static and fatigue loads. JNC16, Jun 2009, Toulouse, France. 6 p. hal-00429906

**HAL Id: hal-00429906**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00429906>**

Submitted on 5 Nov 2009

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Comportement à rupture dans le sens des fibres de FRP sous chargement statique et de fatigue

## *Behaviour until rupture of FRP in the fibre direction under static and fatigue loads*

Christian Hochard, Yannick Thollon

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

### Résumé

La rupture des matériaux composites est due à de nombreux mécanismes agissants à différentes échelles. Les modèles basés sur la mécanique de l'endommagement peuvent décrire les endommagements diffus progressifs induits par de petites fissures parallèles à la direction des fibres [1-2]. Même si la taille de ces fissures correspondent à l'épaisseur du pli, elles ne mènent pas en général à la rupture du stratifié. Par contre, la rupture d'un pli dans la direction des fibres est en général catastrophique pour le stratifié et la structure. Dans cet article, nous proposons une analyse expérimentale et un modèle à l'échelle du pli pour décrire la rupture dans le sens des fibres pour des chargements statique et de fatigue. Ce modèle repose sur une diminution de la résistance sens fibre pour des niveaux d'endommagement transverse élevés. Dans un premier temps, on rappelle le modèle d'évolution de l'endommagement associé aux fissures parallèles aux fibres, pour des chargements statiques et de fatigue [3].

### Abstract

The rupture of composite materials is due to many mechanisms acting on various scales. The models based on damage mechanics can describe the progressive diffuse damages induced by small cracks parallel with the direction of the fibres [1-2]. Even if the size of these cracks corresponds to the thickness of the ply, they do not lead in general to the rupture of the laminate. On the other hand, the rupture of a ply in the fibre direction is in general catastrophic for the laminate and the structure. In this article, we propose an experimental analysis and a ply scale to describe the rupture in the fibre direction for static loadings and fatigue. This model rests on a reduction in fibre direction resistance for high levels of transverse damage. Initially, one points out the model of evolution of the damage associated with the cracks parallel with fibres, for static loadings and fatigue [3].

**Mots Clés** : endommagement composite stratifié, rupture pli sens fibre

**Keywords** : laminated composite damage, ply rupture in the fibre direction

## 1. Introduction

La rupture des matériaux composites est due à de nombreux mécanismes agissants à différentes échelles. Les modèles basés sur la mécanique de l'endommagement peuvent décrire les endommagements diffus progressifs induits par de petites fissures parallèles à la direction des fibres [1-2]. Même si la taille de ces fissures correspondent à l'épaisseur du pli, elles ne mènent pas en général à la rupture du stratifié. Par contre, la rupture d'un pli dans la direction des fibres est en général catastrophique pour le stratifié et la structure. Dans cet article, nous proposons un modèle à l'échelle du pli pour décrire la rupture dans le sens des fibres pour des chargements statique et de fatigue. Ce modèle repose sur une diminution de la résistance sens fibre pour des niveaux d'endommagement transverse élevés. Dans un premier temps, on rappelle le modèle d'évolution de l'endommagement associé aux fissures parallèles aux fibres, pour des chargements statique et de fatigue [3].

Le caractère adoucissant du comportement peut conduire à des ruptures de structures par instabilité ou localisation de l'endommagement [1-2-3]. Ce type de rupture apparait principalement pour des chargements de cisaillement dans le repère des plis. La rupture dans le sens des fibres se caractérise par un comportement plus fragile et peut être décrit par des critères classiques de résistance pour des chargements statiques. Pour des plis unidirectionnels fibres de carbone, sollicités dans le sens des fibres uniquement, la résistance n'est pas sensiblement modifiée par des sollicitations de fatigue [4]. Pour des tissés équilibrés avec des fibres de carbone [5] ou de verre [3], la résistance dans le sens des fibres diminue pour des chargements de fatigue. On peut remarquer également que, pour des chargements de fatigue, les plis tissés équilibrés, qui peuvent être considérés comme des stratifiés  $[0^\circ, 90^\circ]$  constitués de plis unidirectionnels, le coefficient de Poisson tend vers 0. Cela peut s'expliquer par un niveau d'endommagement transverse très élevé. Le modèle que nous proposons pour décrire la diminution de la résistance repose sur une diminution de la résistance pour des niveaux d'endommagement transverse très élevés.

## 2. Endommagement en statique et fatigue de plis tissés déséquilibrés

### 2.1 Endommagement en statique

#### 2.1.1 Essais de traction

Un modèle défini pour les plis tissés déséquilibrés a été proposé. Ce modèle général peut être employé aussi bien pour les plis quasi-UD que pour les plis tissés équilibrés. Comme exemple, nous traitons le comportement d'un pli tissé déséquilibré verre/epoxy, présenté Fig. 1. Pour cet exemple, le renfort en verre E est un satin de cinq avec 83% de fibres dans la direction chaîne et 17% dans la trame. Afin d'observer le comportement du matériau, des essais de tractions avec décharges ont été réalisés sur des éprouvettes constitués de 8 plis.

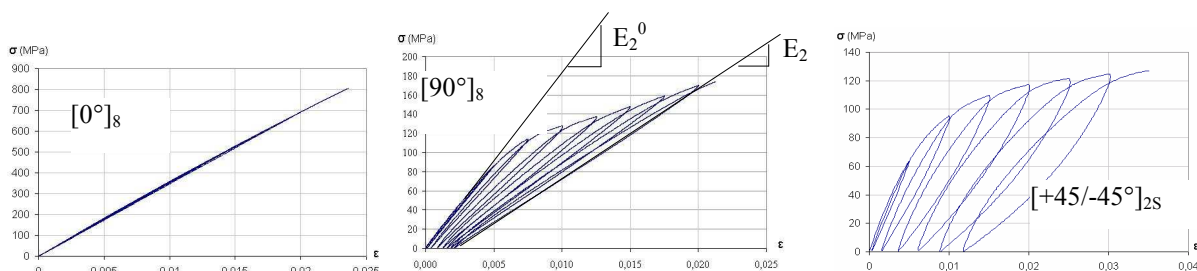


Fig.1 : Evolution de la contrainte en fonction de la déformation des plis tissés déséquilibrés (83/17).

On observe un comportement élasto-endommageable dans les directions chaîne et trame, et élasto-plastique endommageable en cisaillement. La rupture des matériaux composites est due à de nombreux mécanismes agissants à différentes échelles. Les modèles basés sur la mécanique de l'endommagement peuvent décrire les endommagements diffus progressifs induits par de petites fissures parallèles à la direction des fibres [1-2].

On mesure cet endommagement sur les diagrammes d'essai de tractions avec décharges sachant que l'endommagement se traduit macroscopiquement par une baisse de la rigidité du matériau :  $d = 1 - \frac{E}{E^0}$  où  $E$  est la rigidité du matériau et  $E^0$  est la rigidité initiale (Fig. 1).

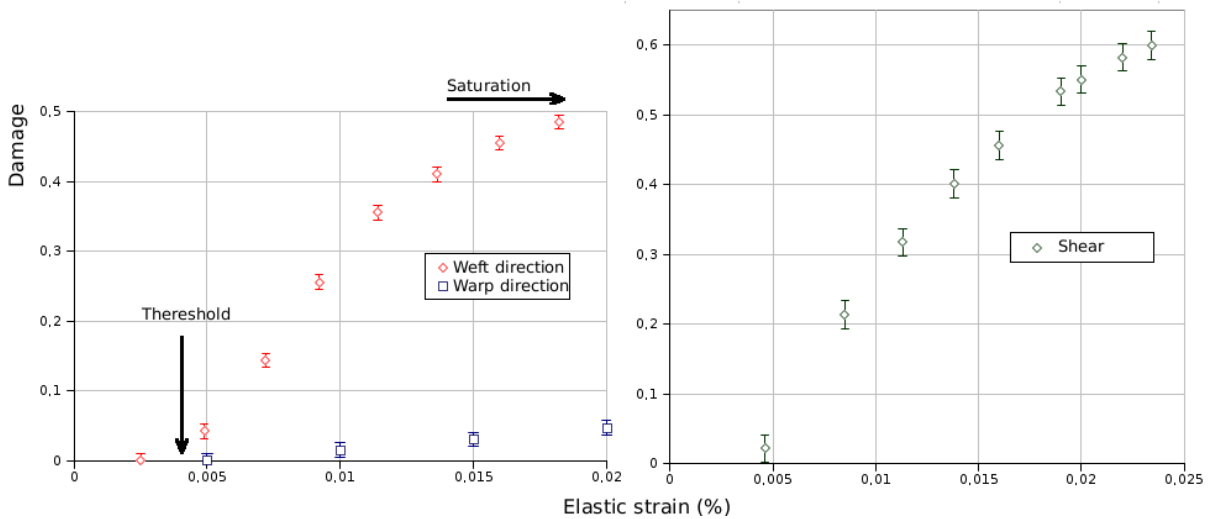


Fig. 2 : Evolution de l'endommagement en fonction de la déformation élastique.

L'endommagement se développe à partir d'un certain seuil, avec une évolution plutôt non linéaire, jusqu'à une certaine limite qui correspond à la saturation du pli (Fig. 2).

### 2.1.2 Modèle

Un modèle défini pour les plis tissés déséquilibrés a été proposé. Ce modèle général peut être employé aussi bien pour les plis quasi-UD que pour les plis tissés équilibrés. Il consiste à remplacer le pli tissé déséquilibré par deux plis unidirectionnels qui respectent les ratios d'épaisseurs dans les sens chaîne et trame (Fig. 3).

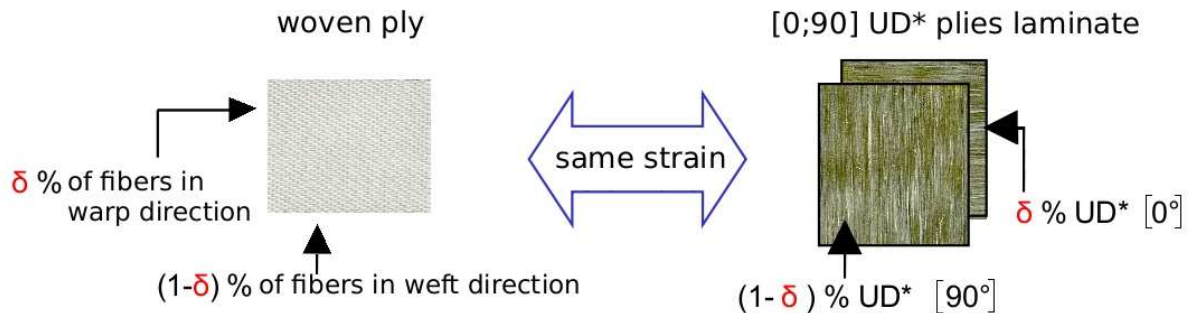


Fig. 3 : Modèle généralisée.

Le modèle est basé sur la mécanique de l'endommagement pour décrire la baisse de rigidité suivant les directions transverse et en cisaillement. La rupture est associée soit à des phénomènes d'instabilité de structure en cisaillement soit à une rupture fragile dans le sens des fibres (contrainte max). Il a été validé pour des chargements statiques (Fig. 4).

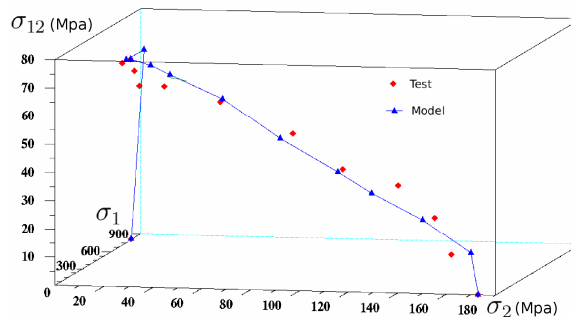


Fig. 4. Validation du modèle en statique pour des chargements combinés (essais hors axe)

## 2.2 Endommagement en fatigue

Un modèle d'évolution de l'endommagement pour des chargements statiques et de fatigue a été proposé [3,4]. Ce modèle basé sur un endommagement cumulé permet de décrire son évolution pour des chargements combinés et dépend du chargement maxi et de l'amplitude.

### 2.2.1 Rupture par instabilité

Pour des sollicitations de cisaillement, tout comme en statique, des phénomènes d'instabilité de structure peuvent apparaître. Par exemple sur un stratifié à 45° (essai hors axe), on peut voir ces différentes influences (Fig. 5).

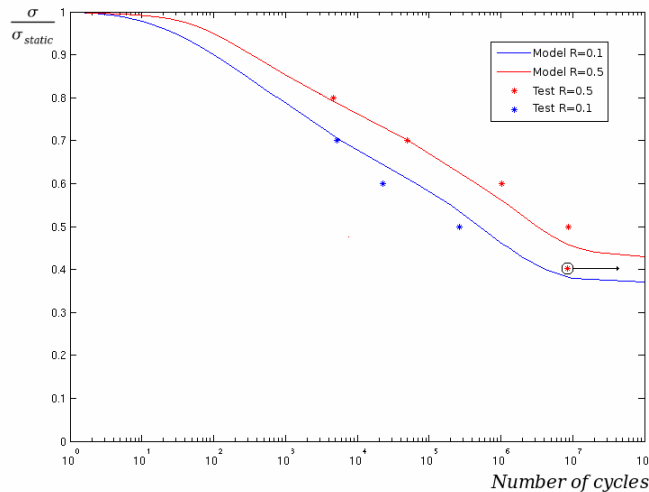


Fig. 5. Rupture par instabilité (essais hors axe)

### 2.2.1 Rupture sens fibre

Dans la direction des fibres, après une phase d'évolution de l'endommagement suivant les directions transverse et de cisaillement (pas d'endommagement progressif dans la direction des fibres), une rupture peut apparaître pour des niveaux de chargement très inférieurs (en contrainte ou en déformation) à ceux observés pour des chargements statiques (Fig. 6).

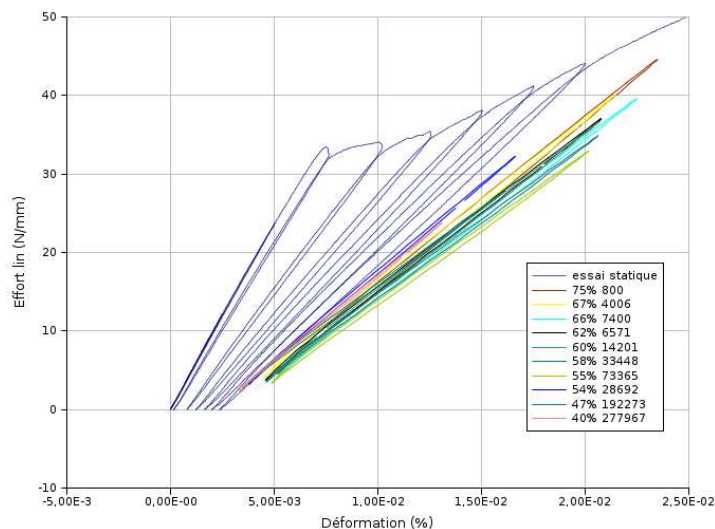


Fig. 6. Traction sens trame en statique et fatigue (dernier cycle avant rupture)

On observe les mêmes phénomènes de rupture prématurée dans la sens des fibres sur les courbes SN sens chaîne et trame (Fig. 7).

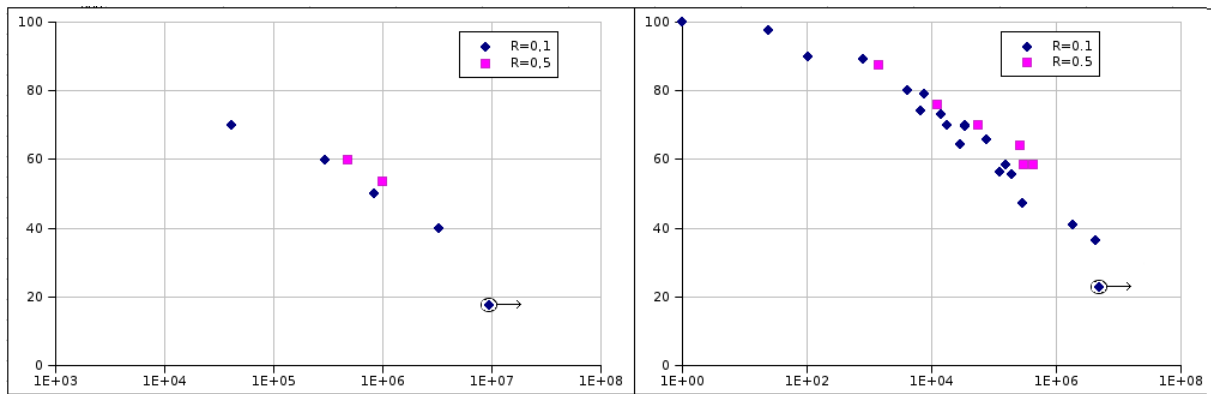


Fig. 7. Courbe SN sens chaîne (à gauche) et sens trame (à droite)

### 2.2.3 Modèle rupture sens fibre

Le modèle que nous proposons pour décrire la diminution de résistance repose sur une diminution de la résistance pour des niveaux d'endommagement transverse très élevés (Fig. 8).

Pour obtenir cette évolution, nous avons effectué des essais de traction sens fibre sur des tubes qui ont été préalablement endommagés par un chargement de torsion (Fig. 9) et différents niveaux d'endommagement.

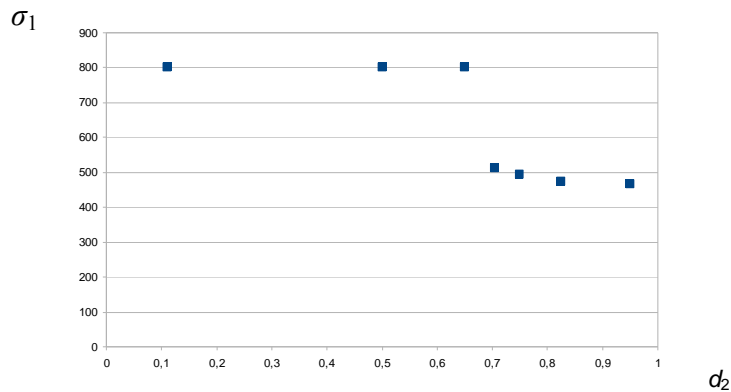


Fig. 8. Résistance sens fibre en fonction de l'endommagement transverse.

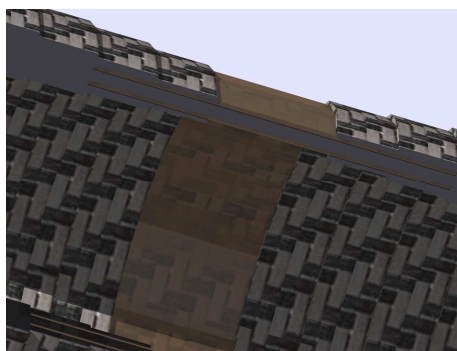


Fig. 9. Les tubes pour les essais de traction/torsion.

## 3. Conclusions

Ce modèle général s'applique à une large gamme de plis tissés et permet de décrire l'évolution de l'endommagement pour des chargements statique et de fatigue. Comme exemple, nous avons traité le comportement d'un pli tissé déséquilibré dont le renfort en verre E est un satin de cinq avec 83% de fibres dans la direction chaîne et 17% dans la trame. Un second exemple a concerné un pli tissé équilibré dont le renfort est en carbone. En plus des essais sur tubes, des essais de validation sur d'autres stratifiés et éprouvettes plates en traction ont également été réalisés.

## Références

- [1] P. Ladevèze, E. Le Dantec, "Damage modelling of the elementary ply for laminated composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 43 pp. 257–267, 1992.
- [2] C. Hochard, P.A. Aubourg and J.-P. Charles, "Modelling of the mechanical behaviour of woven-fabric CFRP laminates up to failure", *Composites Science and Technology*, Vol. 61 pp. 221-230, 2000.
- [3] C. Hochard, Y. Thollon, "A generalized damage model for woven ply laminates under static and fatigue loading conditions" *International Journal of Fatigue*, Accepted, 2009.
- [4] J. Payan, C. Hochard, "Damage modelling of laminated carbon/epoxy composites under static and fatigue loadings", *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, pp. 299-306, 2002.
- [5] Hochard C., Payan J., Bordreuil C., "A progressive first ply failure model for woven ply CFRP laminates under static and fatigue loads" *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, pp. 1270-1276, 2006.
- [6] I. De Baere, W. Van Paepegem, J. Degrieck, "Comparison of different setups for fatigue testing of thin composite laminates in bending", *International Journal of Fatigue*, In Press, Corrected Proof, Available online 27 May 2008.