

## **Endommagement et rupture de composites stratifiés constitués de plis tissés comparés à des plis unidirectionnels**

### ***Damage and fracture of woven ply laminated composites compared to unidirectional ply laminated composites***

**Christian Hochard, Aldo Cocchi, Marco Nappi**

Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, LMA UMR 7031  
4 Impasse Nikola Tesla  
13453 Marseille Cedex 13  
e-mail: hochard@lma.cnrs-mrs.fr

#### **Résumé**

La rupture de structures composites stratifiées est due à de nombreux mécanismes agissant à différentes échelles dont les évolutions dépendent du type de pli, tissé ou unidirectionnel (UD), concernent la matrice ou les fibres et sont fonction de nombreux paramètres (épaisseur des plis, orientations, chargements  $\sigma$ ). Les endommagements de type matriciel démarrent généralement par des décohésions fibre/matrice, fissures qui se propagent pour former des ruptures transverses sur toute l'épaisseur du pli. Dans le cas de plis UD, ces fissures transverses peuvent se propager sur des grandes distances et initier des délaminages. Dans le cas de plis tissés, ces fissures transverses se développent sur toute l'épaisseur des mèches mais leur propagation est stoppée par le croisement des mèches. Dans le cas de plis UD, la cinétique d'évolution de ces fissures transverses dépend de l'épaisseur des plis (ou le nombre de plis de même direction), dépendance qui complexifie la modélisation de ces fissures. Des comparaisons expérimentales de l'influence de l'épaisseur des plis sur le comportement de stratifiés constitués de plis tissés et UD sont présentées ici. Ces résultats sont comparés à des simulations qui intègrent uniquement le comportement intra-laminaire et les limites de ce type de modélisation sont analysées pour les plis UD et tissé.

#### **Abstract**

The fracture of laminate composite structures is due to many mechanisms acting at different scales and depending on the type of ply, woven or unidirectional (UD), concern the matrix or the fibers and are a function of many parameters (thickness, orientations, loads ...). Matrix-type damage usually starts with fiber/matrix decohesions that propagate in the matrix to form transverse cracks over the entire thickness of the ply. In the case of UD plies, these transverse cracks can spread over great lengths and can initiate delamination. In the case of woven plies, these transverse cracks develop over the whole thickness of the yarns but their propagation is stopped by the crossing of the yarns. In the case of a UD ply, the kinetics of development of these transverse cracks depend strongly on the thickness of the ply (or the number of UD plies of the same orientation) which complicates the modeling of these cracks. Experimental comparisons of laminate with UD and woven plies with respect to the thickness are presented here. This experimental results are, only for the description of intralaminar damage, compared to simulations and the limits of this type of modeling for UD and woven ply laminates is underlined.

**Mots Clés :** stratifié, tissé, unidirectionnel, endommagement et rupture, simulation

**Keywords :** laminate, woven, unidirectional, damage and fracture, simulation

## **1. Introduction**

### **1.1 Différence d'évolution de l'endommagement matriciel entre UD et tissé**

La rupture de structures composites stratifiées est due à de nombreux mécanismes agissant à différentes échelles [1,2]. Ces mécanismes différents suivant le type de pli, tissé ou unidirectionnel, concernent la matrice ou les fibres et sont fonction de nombreux paramètres (épaisseur des plis, orientations, chargements  $\sigma$ ).

Les endommagements de type matriciel démarrent généralement par des décohésions fibre/matrice, fissures qui se propagent dans la matrice pour former des ruptures transverses sur toute l'épaisseur du pli. Dans le cas de plis unidirectionnels, ces fissures transverses peuvent se propager sur des grandes distances, en particulier si l'épaisseur (ou le nombre de plis de même direction) est importante. Ces fissures peuvent également initier des délaminages. Dans le cas de plis tissés, ces fissures transverses se développent sur toute l'épaisseur des mèches mais leur propagation est stoppée par le croisement des mèches. Par exemple, pour un stratifié constitué de plis unidirectionnels de même orientation sollicité en traction transverse, le comportement sera de type fragile car à la première rupture transverse (moins de 0,5% pour de l'époxy) l'éprouvette va rompre. Dans le cas d'un stratifié constitué de plis tissés déséquilibré [3] de même orientation sollicité suivant la direction transverse, la fissuration va pouvoir se développer jusqu'à saturation (fig. 1, plus de 2% pour des fils de verre). Notons que dans le cas d'un stratifié croisé  $[0_m, 90_m]_{ns}$  constitué de plis unidirectionnels, les fissures transverses ne vont pas conduire à la rupture de l'échantillon immédiatement et elle vont pouvoir se développer jusqu'à la rupture des fibres. La cinétique de développement de ces fissures dépend fortement des paramètres  $m$  et  $n$  du stratifié ce qui complexifie la modélisation de ces fissures. Cette dépendance est moins importante pour des plis tissés. L'étude expérimentale du comportement à rupture de ce type de stratifié en fonction de  $m$  et  $n$  sera développée par la suite.

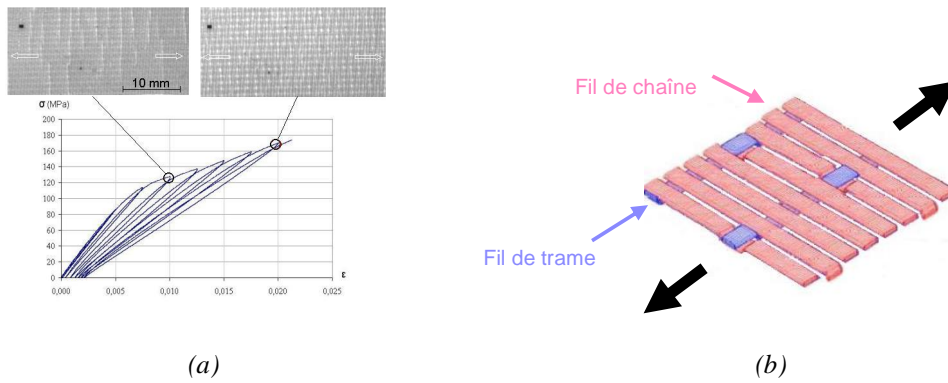


Fig. 1. (a) Evolution de l'endommagement matricielle. (b) tissé verre/exopy déséquilibré.

### 1.2 Résultat préliminaire sur stratifié $[45_m, -45_m]_{ns}$

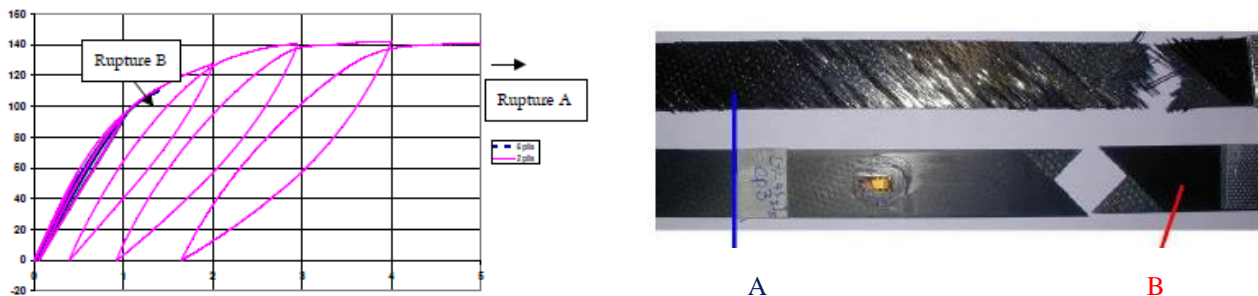


Fig. 2. Endommagement et rupture stratifiés A $[45, -45]_{3s}$  et B $[45_3, -45_3]_s$  [3].

L'étude de l'évolution de l'endommagement matriciel induit par des contraintes de cisaillement est possible quel que soit le type de pli, tissé ou unidirectionnel, à partir d'essais sur des stratifiés  $[45_m, -45_m]_{ns}$ . Dans le cas de contraintes de cisaillement et en raison de l'utilisation d'un stratifié croisé, ces fissures peuvent également se développer jusqu'à des niveaux élevés [4]. Pour certaines matrices, la

rupture de l'échantillon se produit par instabilité due au comportement adoucissement qui entraîne une localisation des endommagements (fig. 1, stratifié A). Cependant, dans le cas de plis unidirectionnels, si le nombre de plis de même orientation augmente ou si l'épaisseur des plis est significative, des ruptures transverses de grandes dimensions qui initient des délaminages et la rupture de l'éprouvette peuvent apparaître (fig. 2, stratifié B). La modélisation de ces fissures est de nature 3D et d'une grande complexité. Cette situation est plus improbable pour les plis tissés.

Enfin, comme le montre l'exemple précédent (fig. 2) des endommagements interlaminaires tels que le délaminage peuvent être observés. Cette situation est possible également pour des plis tissés mais il a été montré expérimentalement que les stratifiés constitués de plis tissés présentent une plus grande résistance à la propagation des fissures interlaminaire que les stratifiés constitués de plis unidirectionnels [5]. De plus, certaines orientations connues pour être délaminantes ( $[\theta, -\theta]_{ns}$  avec  $\theta$  petit par exemple) pour les plis unidirectionnels ne sont pas possible pour les plis tissés qui correspond à un empilement de plis croisés. Cette analyse et les résultats expérimentaux comparés aux simulations montrent que généralement il n'est pas nécessaire de modéliser les endommagements interlaminaire pour décrire la rupture de stratifiés constitués de plis tissés, une analyse coque en contraintes planes est suffisante.

L'ensemble des éléments présentés précédemment sont développés dans le papier sur la base de résultats expérimentaux et, uniquement pour la description des endommagements intralaminaires, comparés à des simulations. Pour les plis unidirectionnels, les limites de ce type de modélisation en fonction de l'épaisseur (ou du nombre) des plis sont soulignées.

## 2. Etude expérimentale comparative entre stratifiés constitués de plis tissés et stratifiés constitués de plis UD équivalents

### 2.1 Définition des stratifiés

Pour des stratifiés constitués de plis tissés, il est toujours possible de définir des stratifiés constitués de plis UD équivalents. Par exemple, pour un stratifié tissé équilibré  $[0]_{ns}$  constitué d'autant de mèches à  $0^\circ$  que de mèches à  $90^\circ$ , l'équivalent UD sera  $[0,90]_{ns}$ . Inversement, pour certains stratifiés constitués de plis UD, il n'est pas possible de définir des stratifiés constitués de plis tissés équivalents. Par exemple, il n'y a pas d'équivalent tissé du stratifié quasi-isotrope UD  $[0,60,-60]_{ns}$ .

Par la suite, nous allons comparer les comportements à rupture de stratifiés constitués de plis tissés et de plis UD équivalents. Nous allons d'abord étudier des stratifiés  $[0_m, 90_m]_{ns}$  en faisant varier les paramètres  $m$  et  $n$  et en effectuant des tractions à  $0^\circ$  et à  $45^\circ$  (équivalent à une traction sur un  $[45_m, -45_m]_{ns}$ ). Nous comparerons ensuite les comportements des stratifiés quasi-isotrope de type  $[0_m, 90_m, 45_m, -45_m]_{ns}$  en faisant varier les paramètres  $m$  et  $n$  en traction à  $0^\circ$  et à  $22,5^\circ$  (suivant la direction la plus éloignée des fibres ou équivalent à  $[22.5_m, -67.5_m, 67.7_m, -22.5_m]_{ns}$ ). Les résultats de ces essais ont été comparés à des modèles numériques qui intègrent le comportement endommageable de ces matériaux qui a déjà été présenté par ailleurs [5, 6].

### 2.2 Stratifiés de type $[0_m, 90_m]_{ns}$

Nous avons effectués des essais sur des stratifiés constitués de plis tissés sergé 2x2 12K et UD. Le tableau 1 présente les différentes orientations. Nous effectuons généralement 3 essais par orientation. Les résultats sont données ensuite avec les valeurs moyennes et les écarts types.

Les stratifiés étudiés pour les plis tissés sont  $[0,90]_{2s}$  et  $[0_2, 90_2]_s$  (comparés à un  $[0]_8$ ) en traction à  $0^\circ$  et en traction à  $45^\circ$  (correspond à une traction sur un stratifié  $[45_m, -45_m]_{ns}$ ). Pour les plis UD, les stratifiés étudiés sont  $[0,90]_{4s}$ ,  $[0_2, 90_2]_{2s}$  et  $[0_4, 90_4]_s$ .

<b>Tissé 12K</b>	$[0,90]_{2s}$	$[0_2,90_2]_s$	$[0]_8$	$[45,-45]_{2s}$	$[45_2,-45_2]_s$	
<b>UD</b>	$[0,90]_{4s}$	$[0_2,90_2]_{2s}$	$[0_4,90_4]_s$	$[45,-45]_{4s}$	$[45_2,-45_2]_{2s}$	$[45_4,-45_4]_s$

Tab. 1. Stratifiés de type  $[0_m,90_m]_{ns}$ .

*Traction à 0°*

Les résultats de traction à 0° pour les différents stratifiés montrent que :

- les plis UD sont sensibles au cumul de plis de même direction (Fig. 3a)
- les plis tissés présentent une résistance moins élevée que le meilleur des UD mais sont moins sensible au cumul (Fig 3b).

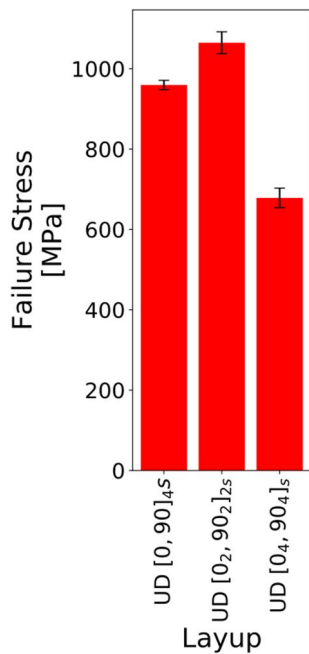


Fig. 3a stratifié UD

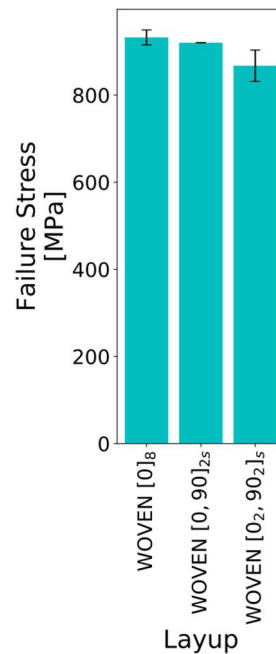


Fig. 3b stratifié tissé 12K

*Traction à 45°*

Les résultats de traction à 45° pour les différents stratifiés montrent que :

- les plis UD sont très sensibles au cumul de plis de même direction (Fig. 4a)
- les plis tissés ne sont pas sensible au cumul (Fig 4b).

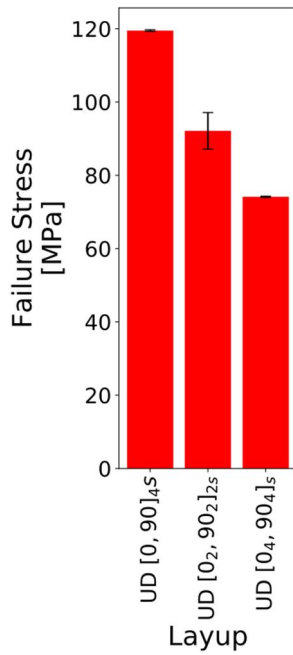


Fig. 4a stratifié UD

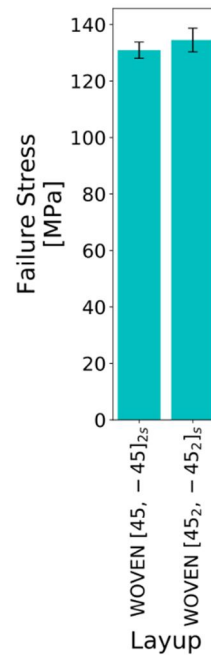


Fig. 3b stratifié tissé

### 2.3 Stratifiés de type quasi-isotrope [0<sub>m</sub>,90<sub>m</sub>,45<sub>m</sub>, -45<sub>m</sub>]<sub>ns</sub>

Pour cette seconde série de essais, nous avons effectué des essais sur des stratifiés quasi-isotrope constitués de plis tissés sergé 2x2 12K et satin 4 3K et UD. Le tableau 2 présente les différentes orientations étudiées. Nous avons effectué une nouvelle fois 3 essais par orientation et les résultats sont données ensuite avec les valeurs moyennes et les écarts types.

Le stratifiés étudiés pour les plis tissés sergé 12K sont [0,45]<sub>2s</sub> et [0<sub>2</sub>,45<sub>2</sub>]<sub>s</sub> avec en traction à 0° et une traction à 22.5° (suivant la direction la plus éloignée des fibres ou équivalent à [22.5<sub>m</sub>,67.7<sub>m</sub>]<sub>ns</sub>) et uniquement [0<sub>2</sub>,45<sub>2</sub>]<sub>s</sub> avec en traction à 0° et une traction à 22.5° pour le satin 3K. Pour les plis UD, les stratifiés étudiés sont [0,90,45,-45]<sub>2s</sub> et [0<sub>2</sub>,90<sub>2</sub>,45<sub>2</sub>, -45<sub>2</sub>]<sub>s</sub> et une traction à 22.5° (suivant la direction la plus éloignée des fibres ou équivalent à [22.5<sub>m</sub>, -67.5<sub>m</sub>, 67.7<sub>m</sub>, -22.5<sub>m</sub>]<sub>ns</sub>).

UD	[0,90,45,-45] <sub>2s</sub>	[0 <sub>2</sub> ,90 <sub>2</sub> ,45 <sub>2</sub> , -45 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>	[22.5,-67.5,67.5,-22.5] <sub>2s</sub>	[22.5,-67.5,67.5,-22.5] <sub>2s</sub>
Tissé 12K	[0,45] <sub>2s</sub>	[0 <sub>2</sub> ,45 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>	[22.5,67.5] <sub>4s</sub>	[22.5 <sub>2</sub> ,67.5 <sub>2</sub> ] <sub>4s</sub>
Tissé 3K		[0 <sub>2</sub> ,45 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>		[22.5 <sub>2</sub> ,67.5 <sub>2</sub> ] <sub>4s</sub>

Tab. 2. Stratifiés quasi-isotrope de type [0<sub>m</sub>,90<sub>m</sub>,45<sub>m</sub>, -45<sub>m</sub>]<sub>ns</sub>.

#### Traction à 0°

Les résultats de traction à 0° pour les différents stratifiés montrent que :

- les plis UD sont sensibles au cumul de plis de même direction (Fig. 5a)
- les plis tissés présentent une résistance moins élevée que le meilleur des UD mais sont moins sensible au cumul (Fig. 5b et Fig. 5c) pour le sergé 12K et le satin 3K.

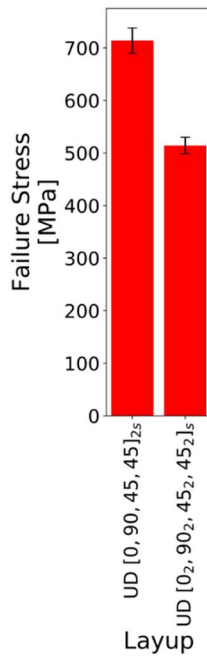


Fig. 5a UD

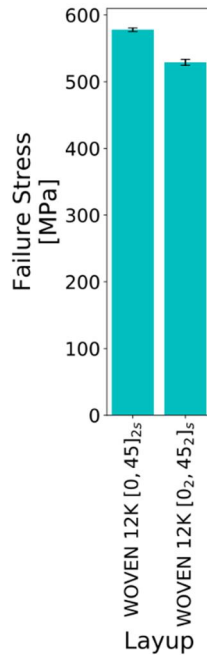


Fig. 5b sergé 12K

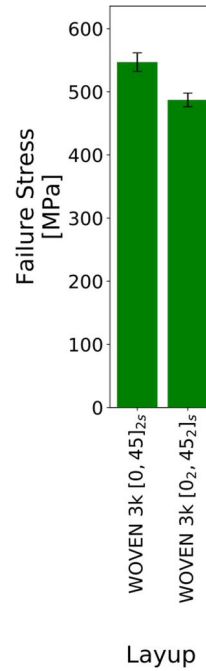


Fig. 5c satin 3K

Traction à 22.5°

Les résultats de traction à 22.5° pour les différents stratifiés montrent que :

- les plis UD sont très sensibles au cumul de plis de même direction (Fig. 6a)
- les plis tissés satin 3K présentent une résistance plus élevée que UD (Fig. 6a) et est moins sensible au cumul (Fig. 6c) alors que le tissu le sergé 12K (Fig. 6B) présente des propriétés similaires à UD.

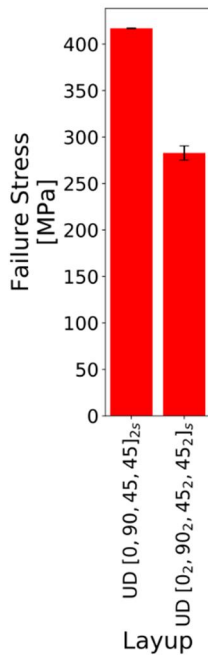


Fig. 6a UD

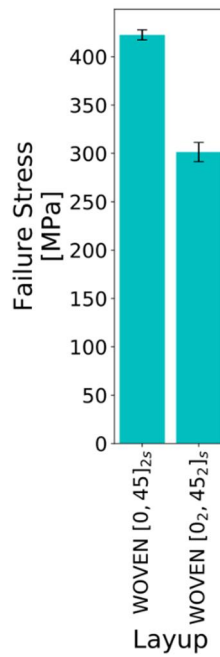


Fig. 6b sergé 12K

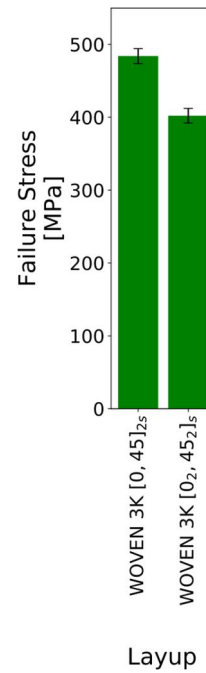


Fig. 6c satin 3K

### 3. Conclusions

Les résultats de ces essais montrent que la résistance de stratifiés constitués de plis UD est sensible au cumul ou épaisseur de plis de même direction alors que les stratifiés constitués de plis tissés le sont moins. Les mécanismes d'endommagement sont très certainement liés à l'épaisseur des plis. Les mécanismes hors plan peuvent conduire à une rupture prématurée des stratifiés. Ces mécanismes hors plan sont difficiles à décrire à l'aide de modèles. Des modélisations des mécanismes intra-laminaires sont plus faciles à mettre en œuvre mais ne sont adaptées qu'aux stratifiés tissés ou UD avec des faibles épaisseurs de plis. Les modèles numériques qui intègrent le comportement endommageable intra-laminaire de ces matériaux a déjà été présenté par ailleurs [5, 6].

### Références

- [1] P. Ladevèze, E. Le Dantec, "Damage modelling of the elementary ply for laminated composites". *Composites Science and Technology*, Vol. 43 pp. 2576267, 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 laminates under static and fatigue loading conditions". *Int. J. Fatigue*, 32(1), pp. 158-165, 2009.
- [4] J. Payan, "Étude du comportement de composites stratifiés sous chargement statique ou de fatigue". Thèse Aix-Marseille Université, 2004.
- [5] C. Hochard, "Optimum design of laminated composite structures". *Composites Structures*, Vol. 63 pp. 159-165, 2004.
- [6] C. Hochard, S. Miot, Y. Thollon, N. Lahellec, J.P. Charles, "Fatigue of laminated composite structures with stress concentrations". *Composites: Part B*;65 pp. 11-16, 2014