

# Modélisation des composites stratifiés jusqu'à rupture : rôle des mécanismes élémentaires et leurs interactions

Federica Daghia, Emmanuelle Abisset, Pierre Ladevèze

► **To cite this version:**

Federica Daghia, Emmanuelle Abisset, Pierre Ladevèze. Modélisation des composites stratifiés jusqu'à rupture : rôle des mécanismes élémentaires et leurs interactions. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.107. hal-00598099

**HAL Id: hal-00598099**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00598099>**

Submitted on 4 Jun 2011

**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.

# **Modélisation des composites stratifiés jusqu'à rupture : rôle des mécanismes élémentaires et leurs interactions**

## ***Modeling until failure of laminated composites: the role of elementary mechanisms and their interactions***

**Federica Daghia<sup>1</sup>, Emmanuelle Abisset<sup>1</sup> et Pierre Ladevèze<sup>1,2</sup>**

1 : LMT-Cachan, ENS Cachan/CNRS/UPMC/PRES UniverSud Paris  
61 avenue du Président Wilson, F-94230 Cachan, France

2 : Chaire de la Fondation EADS 'Techniques Avancées en Calcul des Structures'  
e-mail : daghia@lmt.ens-cachan.fr, abisset@lmt.ens-cachan.fr, ladeveze@lmt.ens-cachan.fr

### **Résumé**

La modélisation jusqu'à rupture des composites stratifiés requiert une représentation fiable des mécanismes élémentaires de dégradation et de leurs interactions. Ce travail s'intéresse à la validation du mésomodèle d'endommagement du LMT-Cachan, en concentrant l'attention sur les mécanismes se situant à l'échelle du pli (fissuration transverse et délaminage). Dans cette optique, des essais de traction sur plaques trouées [1], dans lesquels ces mécanismes jouent un rôle majeur pour la détermination des charges à rupture et les modes de ruine associés, sont considérés.

### **Abstract**

The modelling until final failure of laminated composites requires a reliable representation of the elementary degradation mechanisms and their interactions. This work deals with the validation of the LMT-Cachan damage mesomodel, focusing on the ply scale mechanisms (transverse cracking and delamination). To this end, tensile tests on plates with a hole [1], where these mechanisms play a crucial role in defining the failure loads and associated failure scenarios, are considered.

**Mots-clés :** Stratifiés, Rupture, Mécanique de l'endommagement, Modélisation numérique

**Keywords:** Laminates, Fracture, Damage mechanics, Computational modeling

## **1 Introduction**

L'amélioration de l'efficacité et de la fiabilité de la conception des structures composites nécessite une compréhension approfondie et une modélisation fidèle de l'endommagement jusqu'à rupture du matériau. La microstructure complexe des stratifiés conduit à des modes de rupture complexes, dérivant de l'évolution et de l'interaction de mécanismes élémentaires se développant à l'intérieur et entre les plis. Ainsi, le mode de rupture et la résistance de la structure sont influencés par la séquence d'empilement, l'orientation des plis et par ses dimensions dans le plan [1].

La compréhension détaillée et l'intégration de chaque mécanisme élémentaire dans un modèle adapté au calcul de structures sont la clé de la modélisation de la ruine des composites. L'évolution des mécanismes de dégradation à l'échelle du pli est particulièrement influencée par la microstructure. Notamment, en raison de l'effet de confinement des plis adjacents, la fissuration dans un pli mince se développe plus tard que dans un pli épais. Ceci affecte à son tour le délaminage par la création de concentrations de contrainte en pointe de fissure. Ainsi, non seulement ces effets structuraux à l'échelle micro déterminent le comportement local du composite, mais souvent, ils jouent un rôle crucial dans la rupture globale de la structure.

Le mésomodèle d'endommagement des stratifiés développé au LMT-Cachan [2, 3] introduit tous les mécanismes de dégradation élémentaires dans une description continue du comportement du pli et de

l'interface. Les mécanismes à l'échelle du pli sont modélisés en se basant sur une description micro-mécanique et un principe d'équivalence énergétique entre l'échelle micro et l'échelle méso [2, 4, 5]. Des lois d'évolution sont définies pour chaque mécanisme et identifiées à partir d'essais standard de traction, compression et délaminage. Cela permet d'inclure les effets microstructuraux, sans introduire à priori des fissures dans les plis ou les interfaces, dans une stratégie de modélisation adaptée à des calculs de structure.

L'objectif de ce travail est de montrer la capacité du mésomodèle à reproduire les modes de rupture complexes et sa fiabilité concernant la prédiction de la tenue des structures. L'accent est mis sur le rôle de chaque mécanisme élémentaire dans la ruine globale de la structure. Une série d'essais de traction sur plaques trouées quasi-isotropes est utilisé pour cette validation [1]. Ces essais illustrent en détails l'effet de la séquence d'empilement, de l'épaisseur du pli et des dimensions de l'éprouvette dans le plan sur la résistance et le mode de rupture de la structure. Un certain nombre de configurations, impliquant l'épaisseur du pli et les dimensions de l'éprouvette dans le plan, ont été sélectionnées et simulées via un code élément finis de recherche basé sur le mésomodèle d'endommagement.

Un premier ensemble de simulations, prenant en compte la description de tous les mécanismes élémentaires, permet de montrer la bonne prédiction de la résistance et du mode de rupture pour différentes dimensions de l'éprouvette. Dans une seconde série de simulations, deux mécanismes élémentaires d'endommagement sont tour à tour annulés : l'effet d'épaisseur du pli et le couplage entre fissuration et délaminage. La comparaison entre les résistances et les cartes d'endommagement obtenues avec le modèle complet ou le modèle affaibli montre l'importance de ces mécanismes élémentaires dans la prédiction du comportement à rupture de la structure globale.

## **2 Un modèle d'endommagement pour les composites**

Dans cette partie, les hypothèses fondatrices du mésomodèle ainsi que la modélisation des mécanismes d'endommagement élémentaires sont brièvement rappelés. Plus de détails sont donnés dans [2, 3].

### **2.1 Hypothèses de base**

Le modèle repose sur l'hypothèse que le comportement de toute structure stratifiée peut être prédite à partir du comportement de deux constituants élémentaires : le pli et l'interface (Figure 1). Chacun de ces mesoconstituants est modélisé comme un milieu continu endommageable et des variables d'endommagement (constantes dans l'épaisseur de chaque pli) sont définies pour chaque mécanisme de dégradation élémentaire identifié :

- Pour le pli (mécanismes intralaminaires) :
  - Dégradation diffuse (échelle de la fibre), associée à la décohésion fibre/matrice et aux dégradations de la matrice à petite échelle ;
  - Fissuration transverse (échelle du pli), associée à des fissures traversants l'épaisseur d'un pli ;
  - Rupture des fibres.
- Pour l'interface (mécanismes interlaminaires) :
  - Délaminage diffus, associé principalement aux sollicitations hors-plan ;
  - Délaminage localisé, associé aux concentrations de contraintes générés par les fissures intralaminaires.

Les mécanismes à très petite échelle, tel que la dégradation et le délaminage diffus ou la rupture des fibres, sont introduits directement à l'échelle méso via des lois d'évolution phénoménologiques. Les

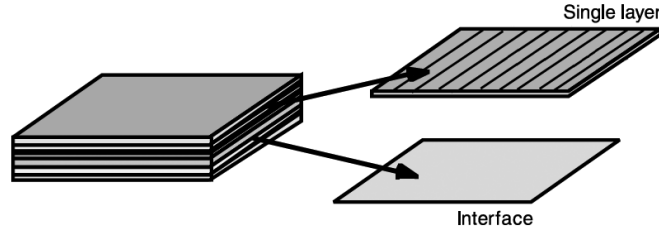


Fig. 1. Décomposition du stratifiés en deux mésoconstituants.

mécanismes à l'échelle du pli, d'autre part, sont dérivés à partir d'un modèle micromécanique, associé à un principe d'équivalence énergétique. Ceci permet de comprendre et de décrire l'effet de l'épaisseur du pli sur la fissuration transverse et le couplage entre la fissuration transverse et le délaminage.

## 2.2 Équations du pli

L'énergie de déformation du pli est définie par [3] :

$$\begin{aligned}
 2e_d = & \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1^0(1-d_f)} & -\frac{\nu_{12}^0}{E_1^0} & -\frac{\nu_{13}^0}{E_1^0} \\ -\frac{\nu_{12}^0}{E_1^0} & \frac{1}{E_2^0(1-[\sigma_{22}]^+d_{22})(1-[\sigma_{22}]^+d')} & -\frac{\nu_{23}^0}{E_2^0(1-[\sigma_{22}]^+d_{22})} \\ -\frac{\nu_{13}^0}{E_1^0} & -\frac{\nu_{23}^0}{E_2^0(1-[\sigma_{22}]^+d_{22})} & \frac{1}{E_3^0(1-[\sigma_{33}]^+d')} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \end{bmatrix} + \\
 & + \frac{\sigma_{12}^2}{G_{12}^0(1-d_{12})(1-d)} + \frac{\sigma_{13}^2}{G_{13}^0(1-d)} + \frac{\sigma_{23}^2}{G_{23}^0(1-d_{23})(1-\bar{d}_{23})}. \quad (\text{Eq. 1})
 \end{aligned}$$

Ici,  $d$ ,  $d'$  and  $\bar{d}_{23} = f(d')$  sont les variables d'endommagement associées à la dégradation diffuse,  $d_f$  est associée à la rupture fibre, et  $d_{22}$ ,  $d_{12}$ ,  $d_{23}$  décrivent la fissuration transverse. Le caractère irréversible de l'endommagement est pris en compte au travers de la fonction d'Heaviside  $[\bullet]^+$ .

Une loi d'évolution différente est définie pour chaque variable d'endommagement. Ces lois sont pilotées par la force thermodynamique associée à chaque variable  $d_n$  :  $Y_{d_n} = \frac{\partial \langle \langle e_d \rangle \rangle}{\partial d_n}$ .

*Remarque* : Afin d'éviter la localisation numérique de l'endommagement, un effet retard a été introduit dans les lois d'évolution [6].

**Dégradation diffuse et rupture des fibres** Les lois d'évolution associées à ces mécanismes sont directement définies à l'échelle méso. La dégradation diffuse est décrite par une loi d'évolution progressive, la rupture des fibres par une loi d'évolution fragile.

**Fissuration des plis et effet d'épaisseur** La fissuration matricielle à l'intérieur du pli est fortement influencée par la microstructure : les fissures traversent l'épaisseur d'un pli, puis elles se développent parallèlement à la direction des fibres. Dans le mésomodèle, ce schéma de fissuration est décrit par une densité de fissures  $\rho = h/D$  (où  $h$  est l'épaisseur du pli et  $D$  la distance dans le plan entre deux fissures, supposées localement périodiques). Le principe d'équivalence énergétique permet de calculer les variables d'endommagement associées aux trois modes d'ouverture ( $d_{22}(\rho)$ ,  $d_{12}(\rho)$  et  $d_{23}(\rho)$ ) à partir d'un  $\rho$  donné.

La loi d'évolution pour la variable  $\rho$  est fondée sur un double critère en énergie (pour les plis fins,

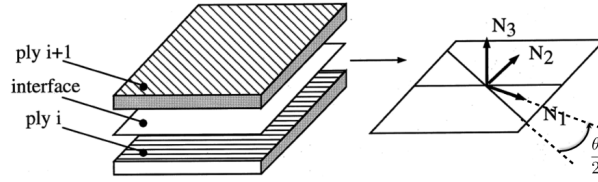


Fig. 2. Directions d'orthotropie de l'interface.

$h < \bar{h}$ ) et en contrainte (pour les plis épais,  $h > \bar{h}$ ). Ceci permet de décrire l'effet d'épaisseur observé expérimentalement [7] : les plis épais fissent plus facilement que les plis fins, et ceci jusqu'à atteindre une épaisseur limite  $\bar{h}$  au delà de laquelle cette dépendance disparaît. De plus, une densité de fissure maximale est introduite ( $\rho \leq \rho_s$ ) : quand  $\rho$  atteint la saturation, le délaminage local prend le relais, ce qui est introduit dans le modèle d'interface décrit ci-après.

**Non linéarité élastique et comportement anélastique** En plus du comportement endommageable, le mésomodèle prend en compte la non-linéarité dans la direction des fibres et le comportement anélastique de la matrice dans les directions transverses.

### 2.3 Équations de l'interface

L'énergie de déformation de l'interface est définie par :

$$2e_{d,int} = \frac{\sigma_{33}^2}{K_3^0 (1 - [\sigma_3]^+ d_I)} + \frac{\sigma_{13}^2}{K_1^0 (1 - d_{II})} + \frac{\sigma_{23}^2}{K_2^0 (1 - d_{III})}, \quad (\text{Eq. 2})$$

où  $K_1^0$ ,  $K_2^0$ ,  $K_3^0$  sont les propriétés élastiques de l'interface et  $d_I$ ,  $d_{II}$ ,  $d_{III}$  sont les variables d'endommagement respectivement associées aux trois modes de délaminage. Les directions d'orthotropie de l'interface sont définies à partir de celles des plis adjacents (Figure 2). La force thermodynamique globale permettant de prendre en compte l'interaction des trois modes de délaminage est définie par :  $Y_{int} = Y_{d_I} + \gamma_{II,int} Y_{d_{II}} + \gamma_{III,int} Y_{d_{III}}$ , où  $\gamma_{II,int}$  et  $\gamma_{III,int}$  sont des paramètres matériaux.

Les lois d'évolutions des variables d'endommagement de l'interface sont :

– Si  $\bar{\rho} < \rho_s$  :

$$d_I = \left( \frac{1}{3} \frac{\langle \bar{Y}_{int} - Y_{0,int} \rangle_+}{Y_{c,int} - Y_{0,int}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (\text{Eq. 3})$$

$$d_{II} = d_I + (1 - d_I) 2a_i \bar{\rho} \sin^2 \left( \frac{\theta}{2} \right), \quad (\text{Eq. 4})$$

$$d_{III} = d_I + (1 - d_I) 2a_i \bar{\rho} \cos^2 \left( \frac{\theta}{2} \right), \quad (\text{Eq. 5})$$

– Si  $\bar{\rho} = \rho_s$  :

$$d_I = d_{II} = d_{III} = 1. \quad (\text{Eq. 6})$$

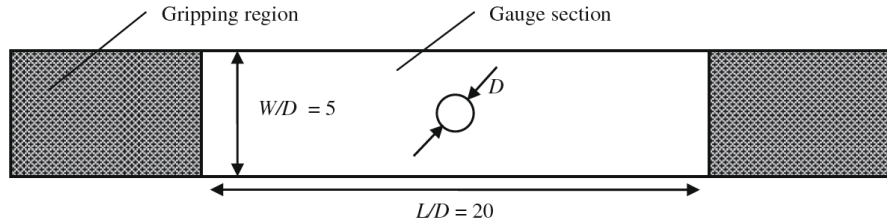


Fig. 3. Géométrie des éprouvettes testées [1].

où  $\bar{Y}_{int} = \sup_{\tau \leq t} (Y_{int})$ ,  $\theta$  est l'angle défini dans la Figure 2,  $\bar{\rho}$  est la densité moyenne de fissuration dans les plis adjacents, et  $a_i$  est un paramètre matériau.

Ces équations permettent de prendre en compte le couplage entre le comportement du pli et celui de l'interface. Cette interaction devient le mécanisme dominant l'endommagement de l'interface lorsque la fissuration dans les plis adjacents atteint le niveau de saturation.

### 3 Essai de traction sur plaques quasi-isotropes trouées

#### 3.1 Bases de données expérimentales et choix des cas tests

La validation proposée ici se base sur les travaux de Wisnom et Hallett [1]. Il s'agit d'une vaste campagne d'essais de traction sur des plaques quasi-isotropes trouées (matériau IM7/8552, empilement  $[45_m/90_m/ - 45_m/0_m]_{ns}$ , géométrie définie en Figure 3) où les variations des paramètres d'empilement  $m$  et  $n$  et des dimensions des éprouvettes dans le plan amènent à des modifications importantes des valeurs à rupture et des modes de ruine associées. Notamment, les faciès de ruine varient entre une rupture nette, dominée par la rupture des fibres (*brittle failure*) et une dégradation étendue sur toute l'éprouvette, dominée par la fissuration transverse et le délaminage (*delamination failure*) comme illustré dans la Figure 4.

Parmi les résultats expérimentaux disponibles, deux jeux d'essais ont été sélectionnés. Ils caractérisent deux effets d'échelle mis en évidence lors de la campagne d'essai et sont considérés comme suffisants pour valider la capacité du mésomodèle à reproduire la rupture d'éprouvettes trouées.

**Série 1 : Influence de l'épaisseur du pli sur le mode de rupture** On étudie le changement de mode de rupture entre les éprouvettes à plis fins (*brittle failure*) et épais (*delamination failure*). Pour ces essais, les dimensions de la plaque et du trou sont constantes : épaisseur = 4 mm,  $W/D = 5$  et  $D = 6.35$  mm. Les paramètres variant sont  $m$  et  $n$  définissant l'empilement. Deux cas ont été étudiés :

- $[45/90/ - 45/0]_{4s}$  : épaisseur du pli  $h = 0.125$  mm,
- $[45_4/90_4/ - 45_4/0_4]_s$  : épaisseur du pli  $h = 0.5$  mm.

**Série 2 : Effet d'échelle des dimensions dans le plan** On étudie l'effet d'échelle dans le plan sur la résistance de la plaque. L'épaisseur de la plaque est fixée à 4 mm, le ratio entre la largeur de la plaque et le diamètre du trou à 5. Les dimensions dans le plan sont multipliées par un facteur 2 et 4 ( $D = 6.35$ , 12.7 et 25.4 mm). Les deux empilements considérés sont : le  $[45/90/ - 45/0]_{4s}$ , composé de plis fins et cassant par rupture des fibres, et le  $[45_4/90_4/ - 45_4/0_4]_s$ , composé de plis épais et cassant par délaminage.

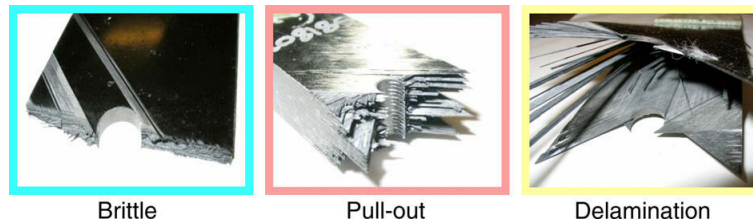


Fig. 4. Les trois modes de rupture identifiés lors de la campagne d'essai [1].

### 3.2 Identification des paramètres et simulations numériques

Les simulations numériques des cas test considérés ont été réalisées en utilisant un code recherche dédié au mésomodèle développé au LMT-Cachan : COFFEE (Composite Failure by Finite Element mesoscale damage mechanics) [8]. Du fait de la symétrie de la géométrie et de l'empilement dans le plan, seule une demi plaque a été modélisée. Un côté de la plaque est fixé, une vitesse de déplacement constante est imposée sur le côté opposé. Les déplacements dans le plan étant dominant, le maillage a été réalisé avec des éléments linéaires. La taille des éléments autour du trou est de l'ordre de grandeur de l'épaisseur du pli, une étude de convergence a validé le maillage.

Un jeu complet de paramètres matériaux pour l'IM7/8552 a été identifié lors du World-Wide Failure Exercise (WWFE-III), en introduisant un certain nombre d'hypothèses en cas de manque d'information [9]. Ces mêmes paramètres ont été utilisés pour les simulations présentées ci-après, la seule exception étant la valeur associée à la rupture sens fibres : la valeur fournie par le WWFE-III étant largement inférieure à celle identifiée et utilisée par Wisnom et son équipe [10], cette deuxième valeur a été retenue.

## 4 Validation du mésomodèle pour les stratifiés

Cette partie porte sur la validation du mésomodèle d'endommagement. D'abord, les deux séries d'essais décrites sont simulées avec le mésomodèle complet pour illustrer sa capacité à reproduire les valeurs à rupture et les modes de ruine associés. Dans un deuxième temps, des simulations "réduites" sont réalisées en annulant tour à tour l'effet d'épaisseur et le couplage pli-interface, pour illustrer le rôle de ces deux mécanismes dans la prévision des modes de rupture.

Les simulations éléments finis permettent de prévoir une valeur à rupture (définie comme la première chute de contraintes d'au moins 5%) et de classer le mode de ruine selon les trois types illustrés dans la Figure 4. Les courbes contrainte-déformation sont donnés dans la Figure 5. Les valeurs à rupture expérimentales et simulées sont collectées dans le Tableau 1, les cartes d'endommagement au moment de la rupture sont illustrées dans la Figure 6 pour le modèle complet, et dans les Figures 7 et 8 pour les modèles "réduits".

Pour la lecture des cartes d'endommagement, on rappelle que les mécanismes élémentaires sont représentés par leur(s) variable(s) associée(s) :  $d_f$  représente la rupture fibre ( $d_f = 1$  correspond à la rupture complète des fibres),  $\rho$  la fissuration transverse ( $\rho_s = 0.7$  correspond à la saturation) et  $d_I$  le délaminage en Mode I ( $d_I = 1$  correspond à une interface complètement endommagée ; dans ce cas,  $d_{II} = d_{III} = 1$ , ainsi, seul  $d_I$  est représenté par souci de clarté).

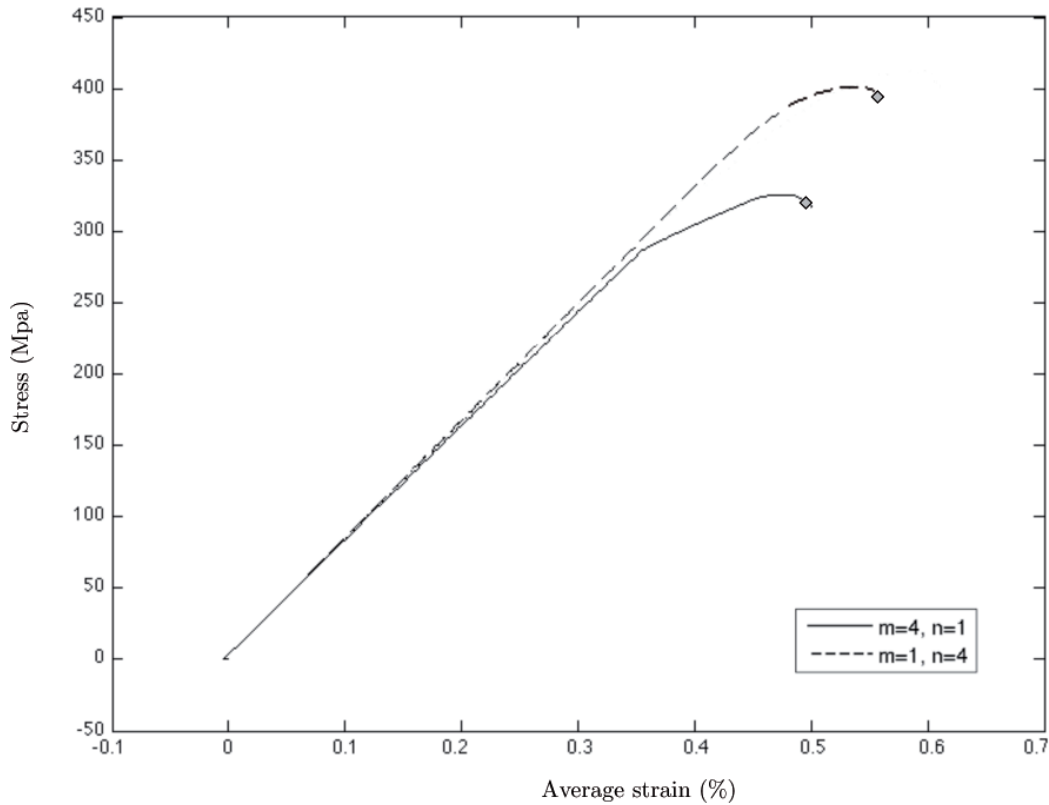


Fig. 5. Courbes contrainte-déformation obtenue pour un diamètre de trou  $D = 6.35$  mm.

#### 4.1 Série 1 : Influence de l'épaisseur du pli sur le mode de rupture

**Pli fin : rupture gouvernée par la rupture fibre** La simulation numérique prévoit une courbe contrainte-déformation qui reste quasi linéaire jusqu'à la chute de contraintes associée à la rupture. Cela indique que l'endommagement sous-critique est très limité. En effet, les cartes d'endommagement montrent de la rupture fibre, du délaminage et de la fissuration transverse dans une zone restreinte autour du trou (voir Figure 6). La rupture a été classifiée comme *brittle*.

Expérimentalement, la rupture de ces éprouvettes a été classifiée comme *pull-out*. Cette différence numérique/expérimental est probablement due à la compétition entre les mécanismes de rupture fibre et de fissuration transverse. Ce dernier apparaît plus tard dans la simulation que dans les observations expérimentales. Toutefois, qu'elle soit *brittle* ou *pull-out*, la ruine est gouvernée par la rupture fibre ([1]), la valeur de contrainte à rupture simulée est donc bien corrélée avec la valeur expérimentale.

**Pli épais : rupture gouvernée par le délaminage** Expérimentalement, la rupture de la plaque est gouvernée par le délaminage. La simulation numérique est en accord avec le schéma de dégradation décrit dans [1] : la dégradation se propage du pli supérieur au pli central. Bien que la rupture soit gouvernée par le délaminage, la simulation prédit de la rupture fibre inexistante dans les observations expérimentales. Dans [10], l'absence de rupture fibre est expliquée par une diminution de la concentration de contraintes en bord de trou, associé à du *splitting* dans le pli à  $0^\circ$ . Le mesomodel décrit la fissuration au travers d'une densité de fissuration, il lui est donc difficile de représenter des localisations de fissure de type *splitting*. Toutefois, la présence de cette rupture fibre affecte peu la valeur de la contrainte à rupture simulée, qui encore une fois est bien corrélée avec la valeur expérimentale.



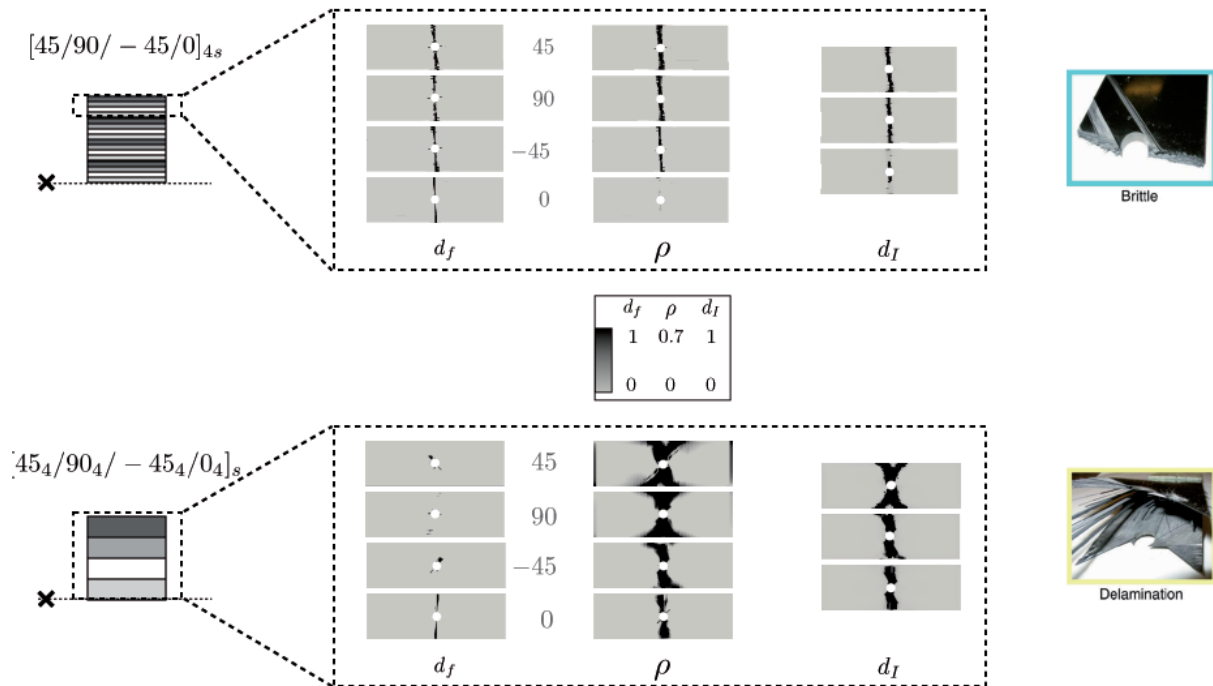


Fig. 6. Carte d'endommagement pour les cas plis fins et plis épais au moment de leur rupture.

Tab. 1. Contraintes à rupture simulées pour les différents cas tests en MPa. Les valeurs expérimentales sont en italiques, les valeurs simulées en caractères droits.

$W/D$	m	n	$T_{ply}$ (mm)	$T$ (mm)	Diamètre du trou (mm)		
					6.35	12.7	25.4
5	1	4	0.125	4	433	374	331
					408	350	303
5	4	1	0.5	4	285	362	417
					310	383	440

Effet d'épaisseur du pli

Effet des dimensions dans le pli

#### 4.2 Série 2 : Effet d'échelle des dimensions dans le plan

L'évolution de l'endommagement et les faciès de rupture étant analogues aux précédents, les cartes d'endommagement et les courbes contrainte-déformation ne sont pas présentées. Les contraintes à rupture numériques et expérimentales sont regroupées dans le Tableau 1.

Du fait des modes de rupture différents, la résistance des éprouvettes à plis fins ou épais évolue différemment avec les dimensions de la plaque dans le plan : la résistance du spécimen décroît avec la taille du trou lorsque la rupture est gouvernée par la rupture fibre (effet d'échelle classique), de manière inverse pour de la rupture par délaminage. La prévision de ces effets d'échelle, observés expérimentalement, constitue un vrai défi pour les modèles dédiés aux composites stratifiés.

**Plis fins : effet d'échelle classique** Quelque soient les dimensions de l'éprouvette, la simulation prévoit une rupture gouvernée par la rupture des fibres. La contrainte à rupture simulée décroît avec les dimensions dans le plan, ce qui correspond à l'effet d'échelle classique prédit par la mécanique de la

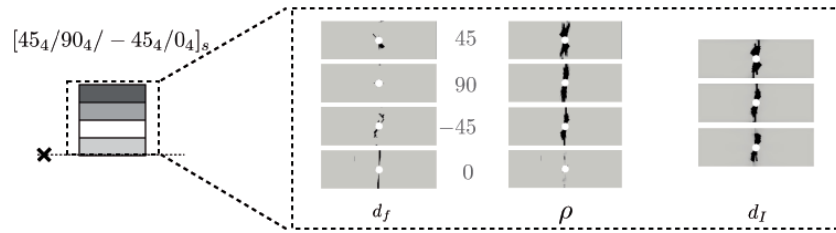


Fig. 7. Carte d'endommagement au moment de la rupture sans l'effet d'épaisseur.

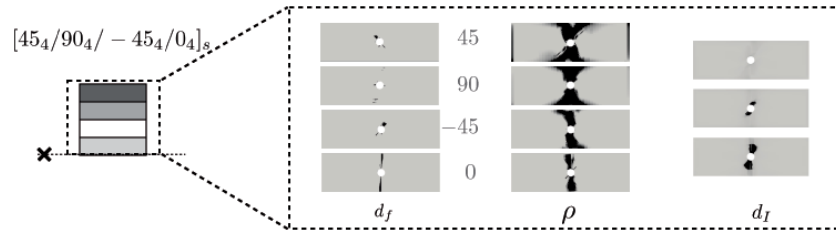


Fig. 8. Carte d'endommagement au moment de la rupture sans le couplage fissuration/délaminage.

rupture et aux observations expérimentales (Tableau 1).

**Pli épais : effet d'échelle inversé** Quelque soient les dimensions de l'éprouvette, la simulation prévoit une rupture gouvernée par le délaminage. La contrainte à rupture simulée croît avec les dimensions dans le plan, ce qui correspond à l'effet d'échelle inversé observé expérimentalement (Tableau 1).

### 4.3 Rôle des mécanismes élémentaires à l'échelle du pli

Pour étudier le rôle de l'effet d'épaisseur et du couplage fissuration-délaminage sur la prévision des modes de rupture, des simulations "réduites" ont été menées en enlevant tour à tour les deux effets. Le cas de figure avec empilement  $[45_4/90_4/-45_4/0_4]_s$  (pli épais) et diamètre du trou  $D = 6.35$  mm a été choisi pour cette étude, car c'est dans celui-ci que la fissuration et le délaminage jouent le rôle le plus important dans la détermination du mode de ruine.

**Annulation de l'effet d'épaisseur** La fissuration dans les plis épais intervient plus tôt que dans les plis fins et cet effet est introduit dans le mésomodèle (voir Section 2.2). Pour en évaluer l'importance, le cas de figure choisi a été simulé en utilisant le critère de fissuration pour un pli de faible épaisseur ( $h = 0.125$  au lieu de  $h = 0.5$ ).

Par rapport à la simulation avec le mésomodèle original, la fissuration dans les pli est fortement sous estimée (voir Figure 7), ce qui implique un délaminage moins étendu. En revanche, la rupture fibre est plus importante. Dans la compétition entre ces deux mécanismes, la rupture fibres est donc favorisée, ce qui mène à une surestimation de la contrainte à rupture ( $\sim +12\%$ ).

**Annulation du couplage fissuration/délaminage** La présence des fissures transverse facilite le développement du délaminage dans les interfaces. Dans le cas de figure en question, ce couplage joue un rôle essentiel. Pour illustrer ce propos, le cas de figure choisi a été simulé en utilisant un modèle d'interface classique, non couplé avec le comportement des plis adjacents.

Bien que la fissuration transverse soit bien représentée, l'absence du couplage ne permet pas au dé-

laminage de se développer de manière importante (voir Figure 8), ce qui implique une représentation erronée du mode de ruine expérimental. La contrainte à rupture est encore une fois surestimée ( $\sim +10\%$ ).

## 5 Conclusion

La validation du mésomodèle d'endommagement du LMT-Cachan proposée ici repose sur des essais de traction sur plaques trouées [1]. Dans ces cas de figure, les mécanismes élémentaires à l'échelle du pli jouent un rôle essentiel. Une description fiable de leurs caractéristiques permet de prévoir correctement les valeurs à rupture et les modes de ruine associés. Les travaux futurs vont se concentrer sur d'autres chargements complexes comme les essais d'indentation statique.

**Remerciements** Les recherches conduisant à ces résultats ont été financées par le Septième programme-cadre de l'Union Européenne FP7/2007-2013 sous la Convention n 213371 (<http://www.maaximus.eu/>).

## Références

- [1] M. R. Wisnom, S. R. Hallett. The role of delamination in strength, failure mechanism and hole size effect in open hole tensile tests on quasi-isotropic laminates. *Composites* 2009 ;40 :335-342.
- [2] P. Ladevèze. Multiscale modelling of damage and fracture processes in composite materials. In : T. Sadowski, Editor. New York : SpringerWien, 2005.
- [3] G. Lubineau, P. Ladevèze. Construction of a micromechanics-based intralaminar mesomodel and illustrations in abaqus/standard. *Computational Mechanics Science* 2008 ;43 :137-145.
- [4] P. Ladevèze, G. Lubineau. On a damage mesomodel for laminates : micro-meso relationships, possibilities and limits. *Composite Science and Technology* 2001 ;61 :2149-2158.
- [5] P. Ladevèze, G. Lubineau, D. Marsal. Towards a bridge between the micro- and mesomechanics of delamination for laminated composites. *Composite Science and Technology* 2006 ;66 :698-712.
- [6] O. Allix, P. Feissel, P. Thévenet. A delay damage mesomodel of laminates under dynamic loading : basic aspects and identification issues. *Computers and Structures* 2003 ;81 :1177-1191.
- [7] A. Parvizi, K. Garrett, J. Bailey. Constrained cracking in glass fibre-reinforced epoxy cross-ply laminates. *Journal of Material Science* 1978 ;13 :195-201.
- [8] F. Bordeu. Robust parallel strategy for non-local meso-scale simulation of composite structures. In : *Proceedings of WCCM/APCOM Conference*. Sydney, July, 2010.
- [9] F. Daghia, P. Ladevèze. Identification and validation of an enhanced mesomodel for laminated composites within the WWFE-III. *Composites Science and Technology*, *Accepted*.
- [10] S. R. Hallett, B. G. Green, W.-G. Jiang, K. H. Cheung, M. R. Wisnom. The open hole tensile test : a challenge for virtual testing of composites. *International Journal of Fracture* 2009 ;169-181.