



**HAL**  
open science

**Sur la validation d'un mésomodèle basé sur la  
micromécanique pour le calcul à rupture des composites  
stratifiés = On the validation of a micromechanics-based  
mesomodel for the simulation until failure of laminated  
composites**

Federica Daghia, Pierre Ladevèze, Philippe Bordeu, Caroline Petiot

► **To cite this version:**

Federica Daghia, Pierre Ladevèze, Philippe Bordeu, Caroline Petiot. Sur la validation d'un mésomodèle basé sur la micromécanique pour le calcul à rupture des composites stratifiés = On the validation of a micromechanics-based mesomodel for the simulation until failure of laminated composites. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00386065

**HAL Id: hal-00386065**

**<https://hal.science/hal-00386065>**

Submitted on 11 Jun 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.

# Sur la validation d'un mésomodèle basé sur la micromécanique pour le calcul à rupture des composites stratifiés

## *On the validation of a micromechanics-based mesomodel for the simulation until failure of laminated composites*

Federica Daghia<sup>1</sup>, Pierre Ladevèze<sup>1,2</sup>, Felipe Bordeu<sup>1</sup> et Caroline Petiot<sup>3</sup>

1 : LMT-Cachan  
61, av du Président Wilson, F - 94235 Cachan CEDEX  
e-mail : daghia@lmt.ens-cachan.fr, ladeveze@lmt.ens-cachan.fr, bordeu@lmt.ens-cachan.fr

2 : Chaire de la Fondation EADS « Techniques Avancées en Calcul des Structures »

3 : EADS - Innovation Works  
12, rue Pasteur, 92152 Suresnes CEDEX  
e-mail : caroline.petiot@eads.net

### Résumé

La rupture des composites stratifiés est un phénomène complexe, dans lequel interviennent plusieurs mécanismes de ruine à différentes échelles. Généralement, l'évolution de l'endommagement a lieu sur une plage importante de chargement et une interaction significative est observée entre les différents mécanismes, qui mène à la rupture finale. Le mésomodèle d'endommagement développé au LMT-Cachan, tout particulièrement dans sa version améliorée issue d'une homogénéisation micromécanique, permet de décrire séparément les mécanismes de ruine et d'étudier leur enchaînement et leur interaction dans la phase finale du chargement. Dans cet article, plusieurs cas de figure sont considérés pour la validation du mésomodèle amélioré. Des simulations numériques sont réalisées à l'aide du logiciel dédié Mesolam/Coffee. Les réponses obtenues sont comparées à des résultats expérimentaux issus de la littérature. L'analyse se concentre en particulier sur la prise en compte de l'effet d'épaisseur sur la fissuration transverse des plis, ainsi que du couplage entre cette dernière et le développement du délaminage.

### Abstract

Fracture of laminated composites is a complex phenomenon, involving a number of mechanisms occurring at different scales. Often the damage evolution occurs over an important part of the loading, and a significant interaction is observed between the different mechanisms, leading to final fracture. The damage mesomodel developed at LMT-Cachan, whose enhanced version is obtained by micromechanical homogenization, allows to separately describe the mechanisms and to study their succession and interaction in the final part of the loading. In this article, various test cases are considered to validate the enhanced mesomodel predictions. Numerical simulations are developed using the dedicated software Mesolam/Coffee. The obtained responses are compared with experimental results available in the literature. The analysis is focused particularly on the micromechanically introduced features, that is the thickness effect on ply transverse cracking and the coupling between transverse cracking and interface delamination.

**Mots Clés** : mésomodèle d'endommagement, validation, couplage fissuration/délaminage

**Keywords** : damage mesomodel, validation, cracking/delamination coupling

## 1. Introduction

Une prévision fiable de l'endommagement et de la rupture des composites stratifiés est essentielle pour la conception de leurs applications structurales. De part leur caractère hétérogène, les stratifiés présentent un comportement très complexe, qui fait intervenir plusieurs échelles d'observation, de celle de la fibre ( $\sim 10 \mu\text{m}$ ) à celle du stratifié ( $\sim 1\text{-}10 \text{ mm}$ ), en passant par la dimension caractéristique du pli élémentaire ( $\sim 100 \mu\text{m}$ ). Les mécanismes de dégradation suivants apparaissent dans le pli :

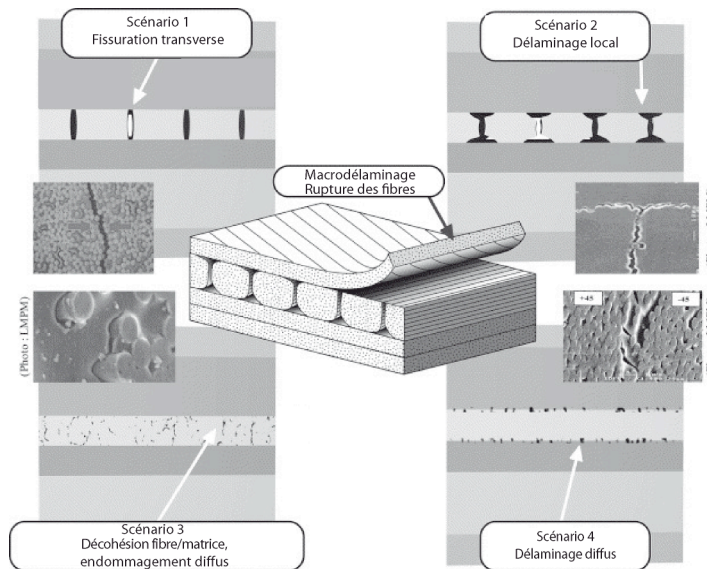


Fig. 1. Mécanismes de dégradation des composites stratifiés.

- décohésion fibre-matrice et endommagement diffus à petite échelle ;
  - fissuration transverse de la matrice, traversant l'épaisseur du pli ;
  - rupture des fibres ;
- et entre les plis :
- délaminage diffus ;
  - délaminage local, induit par les fissures transverses.

Dès que l'endommagement du stratifié atteint un niveau significatif, l'interaction entre ces mécanismes devient prépondérante dans l'évolution de l'état de la structure : leur enchaînement provoque une redistribution des contraintes, à l'origine de la rupture finale. Généralement, ces phénomènes se développent sur une plage importante de chargement. Une compréhension et une modélisation précise de l'évolution de l'endommagement deviennent donc nécessaires pour le dimensionnement des structures composites.

Plusieurs approches pour la modélisation des composites stratifiés ont été proposées dans la littérature. Le récent 'World Wide Failure Exercise' [1-3] a mis en évidence les limites des approches classiques utilisées pour les matériaux traditionnels, fondées sur des critères de rupture. Des approches plus prometteuses ont été développées à travers la modélisation micromécanique des mécanismes de ruine [4-8]. Ces travaux constituent une base pour la connaissance et la compréhension de la physique, en particulier pour la fissuration à l'échelle du pli et le délaminage local. Cependant, ils ne sont pas adaptés à la simulation d'essais structurels de grandes dimensions.

Une avancée vers la mise en place du *virtual testing* pour les composites stratifiés est le développement du mésomodèle d'endommagement du LMT-Cachan, tout particulièrement dans sa version améliorée [9-10]. Alors que le mésomodèle standard est établi depuis les années 80 [11], un modèle micro de référence a récemment été développé [12], et un pont entre les deux échelles a été construit à partir d'une équivalence énergétique [13]. Le mésomodèle amélioré, homogénéisation d'une représentation micromécanique, permet des calculs de structures tout en restant proche de la physique mise en jeu.

Le mésomodèle du LMT-Cachan décrit le stratifié comme un empilement de constituants élémentaires de deux natures différentes, plis et interfaces, modélisés comme des milieux continus plastiques et endommageables. L'endommagement est supposé constant dans l'épaisseur de chaque pli, mais peut varier d'un pli à l'autre. Dans le modèle amélioré, différentes variables d'endommagement sont introduites, chacune d'elles étant associée à un mécanisme à l'échelle de la fibre (décohésion fibre/matrice et rupture fibre) ou du pli (fissuration transverse et délaminage local). De plus, l'interaction entre la fissuration transverse et le délaminage est prise en compte. Actuellement, le mésomodèle est implanté dans Abaqus, Samcef et dans le code LMT Mesolam/Coffee [14].

Plusieurs activités visant la validation du mésomodèle amélioré sont en cours. Un premier volet est la participation au 'Third World Wide Failure Exercise' [15]. Bien que dans cet exercice les essais considérés soient plus exhaustifs que dans les éditions précédentes, ils restent insuffisants pour une validation complète du modèle. En effet, le mésomodèle amélioré décrit de façon séparée les mécanismes de dégradation. Ainsi, il doit être validé en comparant l'évolution propre de chaque mécanisme sur des essais complexes qui mettent en jeu leurs interactions.

Ainsi, le deuxième volet consiste en l'étude détaillée de cas test complexes, d'intérêt industriel. En particulier, on s'intéresse aux accidents de géométrie (plaques trouées en traction) et aux chargements non

standards (impact à basse vitesse et indentation statique). Cet article présente l'analyse de la première thématique, motivée par la disponibilité de résultats expérimentaux détaillés en [16]. La seconde thématique, nécessitant le développement d'un programme expérimental, est en cours et fera l'objet de futures communications.

L'article est organisé de la manière suivante. Dans la Section 2, un résumé du mésomodèle est présenté, mettant en évidence les aspects issus de la micromécanique qui feront l'objet de la validation présentée par la suite. Dans la Section 3, les cas test considérés pour la validation du mésomodèle sont décrits ; puis, les résultats des simulations numériques, effectuées avec le logiciel dédié Mesolam/Coffee, sont présentés et comparés aux résultats expérimentaux [16]. Les conclusions et perspectives de ce travail sont finalement présentées en Section 4.

## 2. Le mésomodèle d'endommagement pour les composites stratifiés

Les deux hypothèses fondamentales du mésomodèle d'endommagement du LMT-Cachan sont les suivantes :

- le comportement d'un stratifié quelconque peut être décrit à partir du comportement de ses constituants élémentaires, c'est-à-dire le pli et l'interface ;
- l'état d'endommagement est constant dans l'épaisseur de chaque pli, mais il peut varier d'un pli à l'autre.

La définition du mésomodèle nécessite donc le choix d'une loi de comportement pour le pli et pour l'interface, supposés plastiques et endommageables.

### 2.1 Loi de comportement pour le pli

L'énergie de déformation du pli s'écrit :

$$2e_d = \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \end{bmatrix}^T \left[ \begin{array}{ccc} \frac{1}{E_1^0(1-d_f)} & -\frac{\nu_{12}^0}{E_1^0} & -\frac{\nu_{13}^0}{E_1^0} \\ -\frac{\nu_{12}^0}{E_1^0} & \frac{1}{E_2^0(1-[\sigma_2]^+ \bar{d}_{22})(1-[\sigma_2]^+ d')} & -\frac{\nu_{23}^0}{E_2^0(1-[\sigma_2]^+ \bar{d}_{22})} \\ -\frac{\nu_{13}^0}{E_1^0} & -\frac{\nu_{23}^0}{E_2^0(1-[\sigma_2]^+ \bar{d}_{22})} & \frac{1}{E_3^0(1-[\sigma_3]^+ d')} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \end{bmatrix} + \frac{\sigma_{12}^2}{G_{12}^0(1-\bar{d}_{12})(1-d)} + \frac{\sigma_{13}^2}{G_{13}^0(1-d)} + \frac{\sigma_{23}^2}{G_{23}^0(1-\bar{d}_{23})(1-d_{23})}. \quad (\text{eq. 1})$$

où  $d$ ,  $d'$  (et  $d_{23} = f(d')$ ) sont les variables associées à l'endommagement à petite échelle (endommagement diffus),  $d_f$  est associé à la rupture des fibres,  $\bar{d}_{12}$ ,  $\bar{d}_{22}$  et  $\bar{d}_{23}$  sont liées à la fissuration transverse. On notera que ces dernières ne sont pas des variables indépendantes, mais dépendent du taux de fissuration  $\rho = h/D$ , où  $h$  est l'épaisseur du pli et  $D$  est la distance entre les fissures. Le symbole  $[\bullet]^+$  représente la fonction d'Heaviside et permet d'introduire le caractère unilatéral de l'endommagement.

Les lois d'évolution de l'endommagement sont définies à partir des forces thermodynamiques associées à chaque variable interne :

$$Y_{d_n} = - \frac{\partial \langle \langle e_d \rangle \rangle}{\partial d_n} \quad (\text{eq. 2})$$

où  $\langle \langle \bullet \rangle \rangle$  représente la moyenne dans l'épaisseur. Les lois d'évolution pour le pli sont décrites en [17].

On rappelle cependant que la force thermodynamique liée à la fissuration transverse dépend de l'épaisseur du pli pour des pli fins. En conséquence, l'évolution du taux de fissuration est pilotée par un critère énergétique pour les plis fins et par un critère en contrainte pour les plis épais. Ceci permet de décrire l'effet d'épaisseur sur la fissuration transverse, observé par plusieurs auteurs [18-20]. La relation entre le taux de fissuration et les variables d'endommagement correspondantes est ensuite obtenue par des calculs micromécaniques.

## 2.2 Loi de comportement pour l'interface

L'énergie de déformation de l'interface s'écrit :

$$2e_{d,int} = \frac{\sigma_{33}^2}{K_3^0 (1 - [\sigma_3]^+ d_I)} + \frac{\sigma_{13}^2}{K_1^0 (1 - d_{II})} + \frac{\sigma_{23}^2}{K_2^0 (1 - d_{III})}, \quad (\text{eq. 3})$$

où  $K_1^0$ ,  $K_2^0$  et  $K_3^0$  sont les propriétés élastiques de l'interface,  $d_I$ ,  $d_{II}$  et  $d_{III}$  sont les variables d'endommagement associées aux trois modes de délaminage.

Les forces thermodynamiques sont définies par analogie à (eq. 2). L'endommagement est piloté par une force thermodynamique globale :

$$Y_{int} = Y_{d_I} + \gamma_{II int} Y_{d_{II}} + \gamma_{III int} Y_{d_{III}} \quad (\text{eq. 4})$$

$$w = \left( \frac{1}{3} \frac{\langle \sup_{\tau \leq t} (Y_{int}) - Y_{0,int} \rangle_+}{Y_{c,int} - Y_{0,int}} \right)^{1/2} \quad (\text{eq. 5})$$

où  $w$  représente l'évolution de l'endommagement,  $\gamma_{II int}$ ,  $\gamma_{III int}$ ,  $Y_{0,int}$  et  $Y_{c,int}$  sont des paramètres matériau.

Les lois d'évolution des variables prennent en compte l'influence de la fissuration des plis adjacents sur l'endommagement de l'interface. La forme suivante du couplage est proposée :

$$d_I = w \quad (\text{eq. 6})$$

$$d_{II} = w + (1 - w) 2a_i \rho \sin^2 \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (\text{eq. 7})$$

$$d_{III} = w + (1 - w) 2a_i \rho \cos^2 \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (\text{eq. 8})$$

où  $\rho$  est le taux de fissuration moyen des deux plis adjacents,  $\theta$  est l'angle entre les fibres des deux plis adjacents et  $a_i$  est un paramètre matériau. De plus, si le niveau de fissuration atteint la saturation dans les deux plis adjacents, l'interface est considérée comme complètement délaminée, donc  $d_I = d_{II} = d_{III} = 1$ .

Comme dans le cas du pli, pour obtenir une modélisation consistante de la localisation de l'endommagement, on introduit un limiteur d'endommagement à partir de considérations dynamiques [21-23].

## 3. Validation du mésomodèle amélioré

La formulation du mésomodèle amélioré, dérivée de considérations micromécaniques, permet de décrire séparément les différents mécanismes de dégradation des composites stratifiés et d'observer leurs interactions et leurs contributions à la rupture finale. Pour valider ce modèle de façon complète, il est donc nécessaire d'évaluer ses prédictions, non seulement en termes de quantités globales (efforts, déformations, valeurs à rupture), mais aussi en termes d'évolution des mécanismes au cours du chargement.

À cet effet, il est intéressant d'exploiter des essais donnant lieu à un comportement non homogène dans l'éprouvette. Celui-ci peut être obtenu par des changements de géométrie, comme des reprises de plis ou des plaques trouées, ou par des chargements non classiques, comme les impacts à basse vitesse. Ces types d'essais permettent de mettre en jeu simultanément plusieurs mécanismes d'endommagement. Ils se développent dans des zones différentes de l'éprouvette et donnent lieu à une redistribution des contraintes, à l'origine de la rupture finale. Des techniques expérimentales permettant l'observation de la dégradation à l'intérieur du stratifié doivent alors être mises en place pour pouvoir obtenir la base de données expérimentales nécessaire à la validation du modèle.

Deux catégories d'essais ont été envisagées pour la validation du mésomodèle amélioré. La première, présentée ci-après, regroupe des essais de traction sur des plaques trouées ayant différents empilements. Ces essais ont été choisis en s'appuyant sur les résultats d'une étude expérimentale récemment menée en [16]. La seconde, développée en collaboration avec EADS-IW, est constituée d'essais d'indentation statique sur plaques quasi-isotropes minces, le but étant d'évaluer la tolérance au dommage des stratifiés sous impact à basse vitesse. Ces travaux sont actuellement en cours.

### 3.1 Simulations d'essais de traction sur plaques trouées

Les essais de traction sur plaques trouées présentés en [16] sont simulés en utilisant le logiciel dédié Mesolam/Coffee, développé au LMT-Cachan [14]. Ce logiciel permet d'effectuer des calculs éléments finis en utilisant les lois de comportement définies dans le mésomodèle amélioré.

Les éprouvettes considérées sont planes, de largeur 36 mm et percées en leur centre (diamètre 6 mm). L'épaisseur du pli élémentaire est de 0.13 mm. La géométrie et les empilements considérés sont représentés en Fig. 2.

Les propriétés matériau nécessaires pour les simulations sont reportées en Tab. 1 (pour le pli) et Tab. 2 (pour l'interface), en utilisant la même notation qu'en [15]. Il s'agit de valeurs caractéristiques des stratifiés carbone-epoxy, la comparaison avec les résultats expérimentaux de [16] ne sera donc que qualitative.

Trois empilements différents sont considérés : deux *cross-ply*,  $[90/0]_{2s}$  et  $[90_2/0_2]_s$ , et un quasi-isotrope  $[45/0/-45/90]_{2s}$ . Grâce à la symétrie du problème, seulement 1/8 du stratifié est simulé pour les *cross-ply*. En revanche, pour le quasi-isotrope, seule la symétrie de l'empilement peut être exploitée et la moitié du stratifié devra être simulée.

Le choix des empilements considérés permet de mettre en évidence des caractéristiques importantes du mésomodèle amélioré, introduites grâce aux considérations micromécaniques. Les deux stratifiés *cross-ply* contiennent les mêmes plis élémentaires, mais leurs empilements respectifs mettent en jeu l'influence de l'épaisseur sur la fissuration transverse. En effet, deux plis élémentaires successifs ayant la même direction des fibres sont considérés comme un seul pli dans le mésomodèle. À son tour, la fissuration joue un rôle important dans le développement du délaminage aux interfaces. Enfin, l'empilement quasi-isotrope permet d'observer une répartition complexe de l'endommagement.

Paramètres élastiques		
$E_1$	GPa	120
$E_2 = E_3$	GPa	9
$G_{12} = G_{13}$	GPa	5
$G_{23}$	GPa	5
$\nu_{12} = \nu_{13}$		0.3
$\nu_{23}$		0.4
$\alpha_1$	$10^{-6}/^\circ\text{C}$	0
$\alpha_2 = \alpha_3$	$10^{-6}/^\circ\text{C}$	36

Endommagement sens fibres			Plasticité		
$Y_F^t$	MPa	20	$R_0$	MPa	20
$Y_F^c$	MPa	8	$R(p)$	MPa	$2800p^{0.6}$
$k$		0	$a$		0
Endommagement diffus			Fissuration transverse		
$Y_0$	MPa	0	$\gamma_I$	$\text{m}^2/\text{KJ}$	10
$Y_c$	MPa	7	$\gamma_{II}$	$\text{m}^2/\text{KJ}$	2.53
$b$		0	$\gamma_{III}$	$\text{m}^2/\text{KJ}$	2.53
Non-linéarité sens fibres			$\bar{h}$	mm	0.52
$\alpha^+$		8			
$\alpha^-$		12			

Tab. 1. Paramètres matériau du pli.

Paramètres élastiques		
$K_3^0$	GPa/mm	385
$K_1^0 = K_2^0$	GPa/mm	115
Paramètres d'endommagement		
$Y_{0\ int}$	$\text{J}/\text{m}^2$	0
$Y_{c\ int}$	$\text{J}/\text{m}^2$	0.3
$\gamma_{II\ int}$		0.5
$\gamma_{III\ int}$		0.5
$a_i$		0.55

Tab. 2. Paramètres matériau de l'interface.

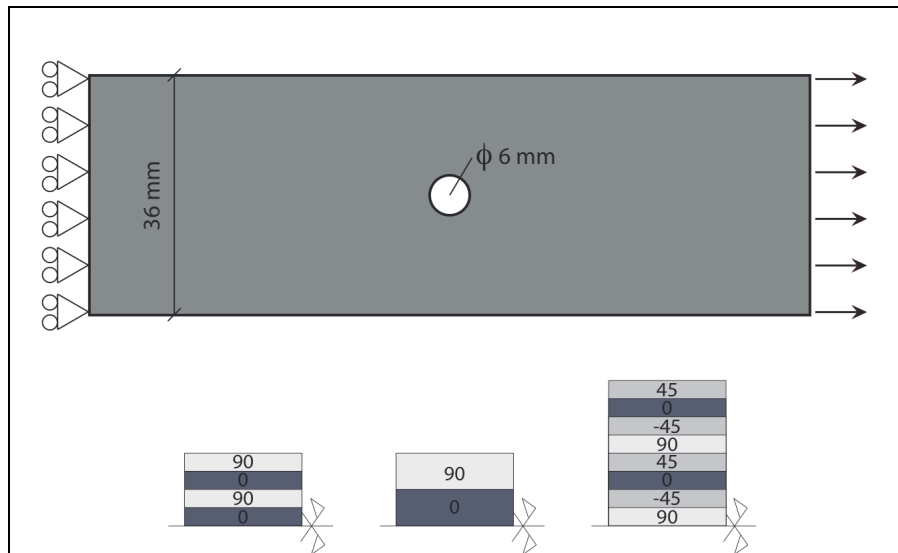


Fig. 2. Plaques trouées en traction : géométrie et empilements considérés.

### 3.2 Résultats

Plusieurs représentations cartographiques des variables d'endommagement obtenues au cours des simulations sont présentées sur les Figs. 3-6. Pour permettre une comparaison aisée avec les radiographies présentées en [16], la distribution de  $\rho$  (taux de fissuration) est représentée pour le pli, et celles de  $d_{II}$  et  $d_{III}$  (délamination) sont représentées pour l'interface.

Dans tous les cas, la ruine de la structure est causée par la rupture des fibres dans les plis de direction  $0^\circ$ , mais l'évolution de l'endommagement est très différente pour les trois empilements.

#### 3.2.1 Empilements cross-ply

Les états d'endommagement dans les deux stratifiés sont comparés pour un même niveau de chargement. La Fig. 3 représente les variables d'endommagement observées pour un niveau de déformation équivalente imposée de 0.6%. Il s'agit d'un niveau de chargement significativement inférieur à celui causant la ruine du stratifié, mais qui permet déjà d'observer les différences qui vont caractériser les comportements des deux éprouvettes jusqu'à rupture.

Dans les plis de direction  $0^\circ$ , le taux de fissuration transverse atteint la valeur à saturation ( $\rho_s = 0.7$ ) près du trou, en suivant des bandes parallèles à la direction de chargement. On est donc capable de représenter le phénomène de *splitting* observé expérimentalement. Conformément à [16], le *splitting* observé est beaucoup plus important dans l'empilement  $[90_2/0_2]_s$  : en effet, dans des plis plus épais la fissuration a lieu à des niveaux plus bas de chargement. De même, la fissuration observée dans les plis de direction  $90^\circ$  est plus significative dans l'empilement  $[90_2/0_2]_s$ , et atteint la valeur de saturation y compris dans des zones de l'éprouvette éloignées du trou.

La variable d'endommagement  $d_{II}$ , représentée pour les interfaces, permet d'évaluer l'état de délamination. Ici, l'endommagement d'interface est principalement lié à la présence de fissures transverses dans les plis adjacents, ce que l'on retrouve très clairement sur les radiographies de [16] où les zones délaménées suivent la direction du *splitting*. Autour du trou, la valeur de  $d_{II}$  atteint 1 (interface complètement délaminée) à cause de la fissuration importante dans les deux plis adjacents. Dans les zones où seule la fissuration transverse des plis à  $90^\circ$  est importante, la valeur de  $d_{II}$  représente la perte de rigidité de l'interface due au délamination local. Comme en ce qui concerne la fissuration transverse, le délamination est plus important pour l'empilement  $[90_2/0_2]_s$ .

#### 3.2.2 Empilement quasi-isotrope

L'évolution de l'endommagement dans l'empilement quasi-isotrope pour différents niveaux de chargement (0.6% et 0.9% de déformation imposée) est représentée sur les vues en coupe des Figs. 4 et 5. La dernière valeur de chargement est très proche de la rupture finale du stratifié. Une vue d'ensemble de l'éprouvette est également proposée en Fig. 6, où l'on observe clairement le caractère non symétrique de

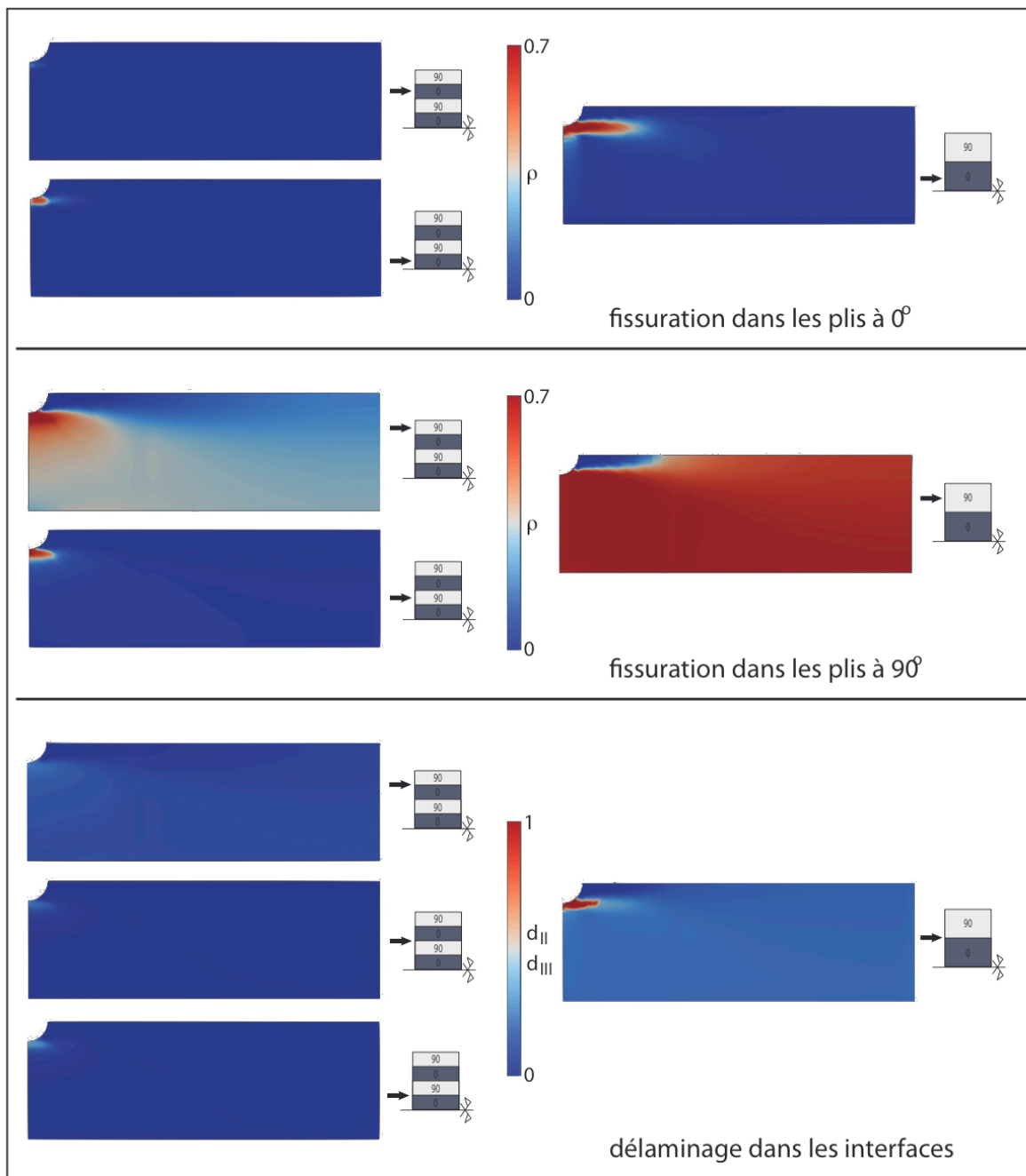


Fig. 3. Fissuration et délaminage pour les empilements cross-ply.

l'endommagement.

Pour une déformation imposée de 0.6% (Fig. 4), la fissuration transverse dans les plis est limitée et concentrée autour du trou, sauf dans le pli central à  $90^\circ$  (dont l'épaisseur est double à cause de la symétrie). L'endommagement lié au délaminage est également très bas. Proche de la rupture complète du stratifié (Fig. 5), l'endommagement a évolué. On peut en particulier observer une forme caractéristique en X pour la zone fissurée, que l'on retrouve dans les essais expérimentaux [16]. De la même manière, le délaminage a augmenté et certaines zones des interfaces atteignent la rupture complète ( $d_I = d_{II} = d_{III} = 1$ ).



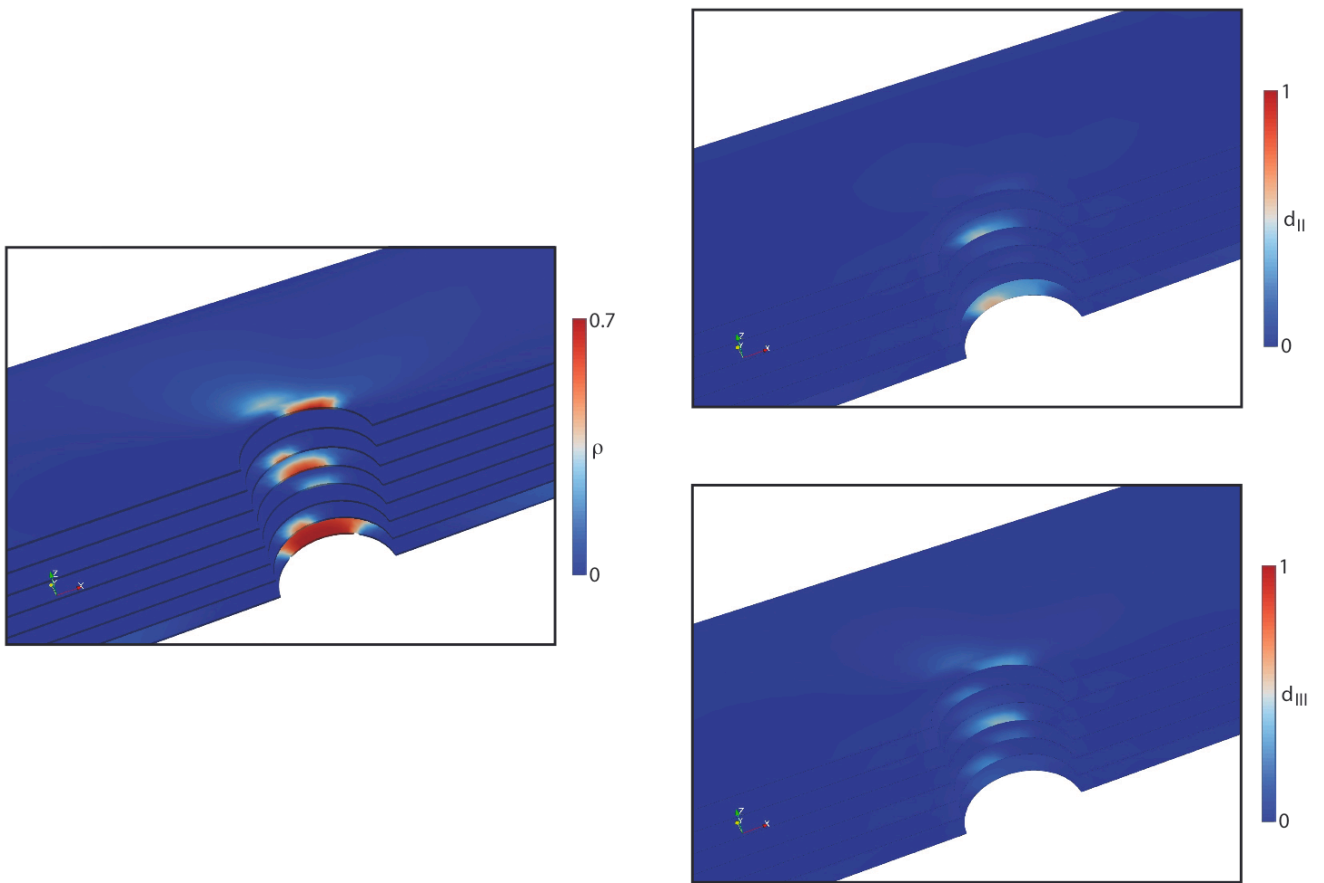


Fig. 4. Fissuration et délaminage pour l'empilement quasi-isotrope, déformation imposée 0.6%.

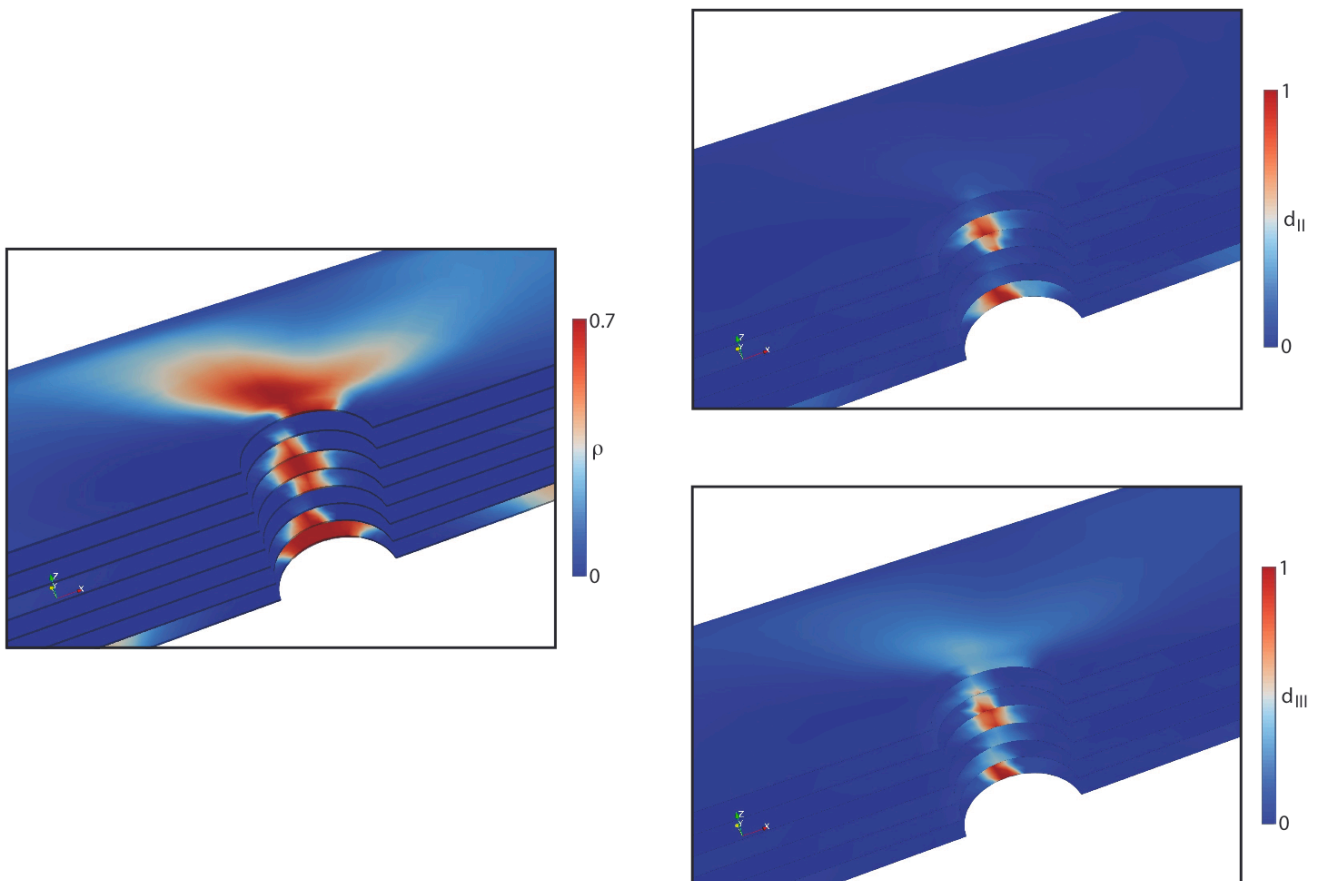


Fig. 5. Fissuration et délaminage pour l'empilement quasi-isotrope, déformation imposée 0.9%.

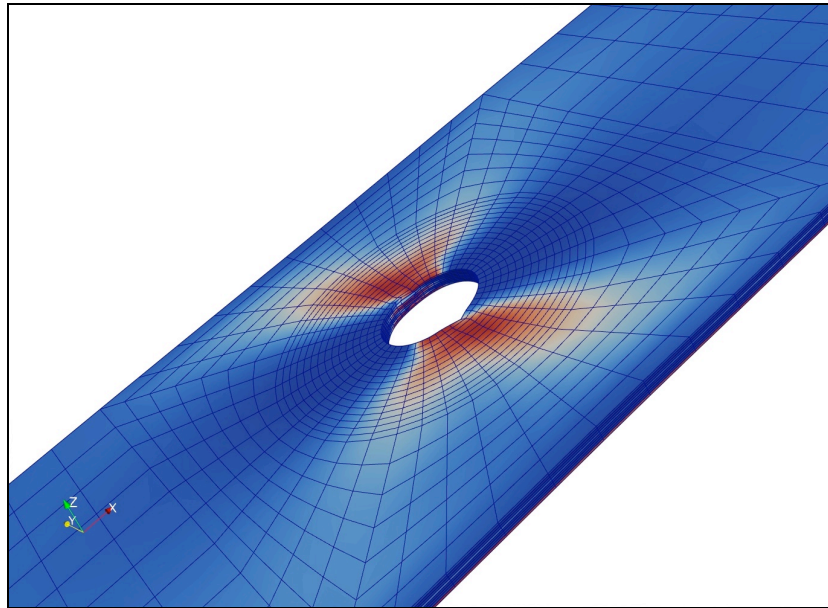


Fig. 6. Fissuration pour l'empilement quasi-isotrope, déformation imposée 0.9%.

#### 4. Conclusions et perspectives

La validation du mésomodèle d'endommagement du LMT-Cachan est abordée en considérant des essais non homogènes et une comparaison détaillée des mécanismes prévus par les simulations à des résultats expérimentaux. Dans cet article, on analyse des essais de traction sur plaques trouées dont les empilements sont choisis conformément aux essais présentés en [16]. Ceux-ci permettent notamment de mettre en évidence l'influence de l'épaisseur du pli sur la fissuration transverse, ainsi que le couplage entre cette dernière et le délaminage des interfaces adjacentes. Une comparaison qualitative exhibe une bonne correspondance entre les prévisions du modèle et les comportements observés expérimentalement.

Pour obtenir une validation quantitative des prévisions du mésomodèle, la mise en place d'essais et de simulations d'impacts à basse vitesse est en cours. Ces travaux feront l'objet de publications ultérieures. Des essais permettant l'identification des paramètres du modèle doivent être mis en œuvre, ainsi que des essais d'indentation statique qui constitueront la base de données pour la validation. Pour ces derniers, des techniques de diagnostic doivent être utilisées afin d'obtenir des cartographies d'endommagement à différents instants du chargement. Une comparaison quantitative de ces cartographies à l'endommagement prévu par les simulations permettra alors une validation complète du mésomodèle amélioré.

#### Références

- [1] M. J. Hinton, P. D. Soden, « Predicting failure in composite laminates : the background to the exercise ». *Composites Science and Technology*, Vol. 58, pp. 1001-1010, 1998.
- [2] M. J. Hinton, A. S. Kaddour, P. D. Soden, « Evaluation of failure prediction in composite laminates : background to 'Part B' of the exercise ». *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 1481-1488, 2002.
- [3] M. J. Hinton, A. S. Kaddour, P. D. Soden, « Evaluation of failure prediction in composite laminates : background to 'Part C' of the exercise ». *Composites Science and Technology*, Vol. 64, pp. 321-327, 2004.
- [4] Z. Hashin, « Analysis of cracked laminates : a variational approach ». *Mechanics of Materials*, Vol. 4, pp. 121-136, 1985.
- [5] G. J. Dvorak, N. Laws, « Analysis of progressive matrix cracking in composite laminates II. First ply failure », *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, pp. 309-329, 1987.
- [6] J. A. Nairn, S. Hu, « The initiation and growth of delamination induced by matrix microcracking in laminated composites », *International Journal of Fracture*, Vol. 57, pp. 1-24, 1992.
- [7] J. A. Nairn, « Matrix microcracking in composites ». In : *Comprehensive Composite Materials : Polymer Matrix Composites*, Publié par E. Talreja & J.-A. Manson, Pergamon Press, 2000.
- [8] J.-M. Berthelot, « Transverse cracking and delamination in cross-ply glass-fiber and carbon-fiber reinforced plastic laminates : Static and fatigue loading ». *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 56, pp. 111-147, 2003.

- [9] P. Ladevèze, G. Lubineau, « On a damage mesomodel for laminates : micromechanics basis and improvements ». *Mechanics of Materials*, Vol. 35, pp. 763-775, 2003.
- [10] P. Ladevèze, « Multiscale computational damage modelling of laminated composites ». In : *Multiscale modelling of damage and fracture processes in composite materials, CISM Courses and Lectures 474*, SpringerWien, New York, 2005.
- [11] P. Ladevèze, « Sur la mécanique de l'endommagement des composites ». In : *Comptes-rendus des 5<sup>e</sup> Journées Nationales sur les Composites (JNC5)*, Publiés par C. Bathias & D. Menkès, pp. 667-683, Pluralis Publications, Paris, 1986.
- [12] P. Ladevèze, G. Lubineau, D. Violeau, « A computational damage micromodel of laminated composites ». *International Journal of Fracture*, Vol. 137, pp. 139-150, 2006.
- [13] P. Ladevèze, G. Lubineau, « On a damage mesomodel for laminates : micro-meso relationships, possibilities and limits ». *Composites Science and Technology*, Vol. 61, pp. 2149-2158, 2001.
- [14] F. Bordeu, P. A. Boucard, G. Lubineau, H. Leclerc « A high performance strategy for the simulation of composites at the mesoscale ». In : *ECT 2008 – 6th International Conference on Engineering Computational Technology*, 2008.
- [15] F. Daghia, P. Ladevèze, « Identification and validation of an enhanced mesomodel for laminated composites within the WWFE-III ». *Composites Science and Technology, soumis*.
- [16] R. M. O'Higgins, M. A. McCarthy, C.T. McCarthy, « Comparison of open hole tension characteristics of high strength glass and carbon fibre-reinforced composite materials ». *Composites Science and Technology*, Vol. 68, pp. 2770-2778, 2008.
- [17] G. Lubineau, P. Ladevèze, « Construction of a micromechanics-based intralaminar mesomodel, and illustrations in ABAQUS/Standard ». *Computational Materials Science*, Vol. 43, pp. 137-145, 2008.
- [18] L. Boniface, P. A. Smith, M. G. Bader, « Transverse ply cracking in cross-ply CFRP laminates - initiation or propagation controlled? ». *Journal of Composite Materials*, Vol. 31, pp. 1080-1112, 1997.
- [19] F. W. Crossman and A. S. D. Wang, « The dependence of transverse cracking and delamination on ply thickness in graphite/epoxy laminates ». In: *Damage in Composite Materials, ASTM-STP 775*, Publié par K. L. Reifsnider, pp. 118-139, 1982.
- [20] A. Parvizi, K. W. Garrett, J. E. Bailey, « Constrained cracking in glass fibre-reinforced epoxy cross-ply laminates ». *Journal of Materials Science*, Vol. 13, pp. 195-201, 1978.
- [21] P. Ladevèze, « About a damage mechanics approach ». In : *Mechanics and Mechanisms of Damage in Composites and Multimaterials*, Publié par D. Baptiste, pp. 119-142, MEP, 1989.
- [22] O. Allix, P. Feissel, P. Thévenet, « A delay damage mesomodel of laminates under dynamic loading: basic aspects and identification issues ». *Computers and Structures*, Vol. 81, pp. 1177-1191, 2003.
- [23] P. Ladevèze, O. Allix, J. F. Deü, D. Lévêque, « A mesomodel for localisation and damage computation in laminates ». *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 183, pp. 105-122, 2000.