

# Modélisation par éléments finis de l'endommagement de composites laminés à fibres tissées soumis à impact

G. Deliège, S. Hannay, J.-P. Ponthot

MN<sup>2</sup>L, Université de Liège, Belgique, {geoffrey.deliege, s.hannay, jp.ponthot}@ulg.ac.be

## 1 Introduction

Les matériaux composites deviennent incontournables dans de nombreux secteurs industriels, où leur exceptionnel rapport poids/résistance permet théoriquement d'alléger les structures de façon significative. Toutefois, pour exploiter pleinement le potentiel de ces matériaux, il est indispensable de faire évoluer en parallèle les outils de simulation numérique largement utilisés en conception. Les composites, du fait leur nature hétérogène et non isotrope, constituent cependant un défi pour les modélisateurs : la mise au point de lois de comportement décrivant avec précision les mécanismes d'endommagement s'avère extrêmement complexe. Cet article décrit un modèle comportemental pour des laminés à fibres tissées et son implantation dans un code éléments finis implicite, en vue de la simulation d'impacts à basse énergie sur des structures composites.

## 2 Lois de comportement

Pour modéliser l'endommagement des laminés, les approches macroscopiques s'avèrent trop peu précises tandis que la simulation directe des fibres et de la matrice polymère n'est envisageable que pour des volumes élémentaires. La méthode adoptée ici, développée initialement à l'Ecole Nationale Supérieure (ENS) de Cachan, consiste à travailler à une méso-échelle intermédiaire entre les échelles microscopique et macroscopique. Le méso-modèle résultant se décompose en un modèle de pli homogène et une interface séparant les plis du laminé. La grande majorité des modèles de plis décrits dans la littérature sont toutefois conçus pour des composites unidirectionnels. L'originalité des travaux présentés ici est la mise au point d'un modèle tridimensionnel de pli tissé sur base des modèles existant pour les plis unidirectionnels 3D d'une part [2,4], et les plis tissés 2D mis au point au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA) de Marseille d'autre part [3]. Les relations contraintes/déformations se déduisent de l'expression de la densité d'énergie de déformation (1),

$$\begin{aligned}
 E_D = \frac{1}{2} & \left( \frac{\sigma_{11}^2}{E_1(1-d_{11})} - 2 \frac{\nu_{12}}{E_1} \sigma_{11} \sigma_{22} - 2 \frac{\nu_{13}}{E_1} \sigma_{11} \sigma_{33} \right. \\
 & + \frac{\sigma_{22}^2}{E_2(1-d_{22})} - 2 \frac{\nu_{23}}{E_2} \sigma_{22} \sigma_{33} + \frac{\sigma_{33}^2}{E_3} \\
 & \left. + \frac{\sigma_{12}^2}{G_{12}(1-d_{12})} + \frac{\sigma_{13}^2}{G_{13}(1-\lambda d_{12})} + \frac{\sigma_{23}^2}{G_{23}(1-\lambda d_{12})} \right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

On définit également une limite élastique et une loi d'écrouissage prenant en compte la plasticité en cisaillement,

$$f = \tilde{\sigma}_{eq} - R(r) - R_0 \quad (2)$$

$$\tilde{\sigma}_{eq} = \sqrt{\tilde{\sigma}_{12}^2 + \tilde{\sigma}_{23}^2 + \tilde{\sigma}_{31}^2 + a^2 \tilde{\sigma}_{33}^2} \quad (3)$$

Les lois d'évolution des trois variables d'endommagement s'expriment en fonction des forces thermodynamiques déduites de (1),

$$\begin{aligned}
Y_{11} &= \frac{\sigma_{11}^2}{2E_1(1-d_{11})^2} \\
Y_{22} &= \frac{\sigma_{22}^2}{2E_2(1-d_{22})^2} \\
Y_{12} &= \frac{\sigma_{12}^2}{2G_{12}(1-d_{12})^2} + \frac{\lambda}{2(1-\lambda d_{12})^2} \left( \frac{\sigma_{13}^2}{G_{13}} + \frac{\sigma_{23}^2}{G_{23}} \right)
\end{aligned} \tag{4}$$

L'endommagement est fragile en direction des fibres et en cisaillement, on a les relations (5-7) :

$$\underline{Y}(t) = \sup_{\tau \leq t} (\alpha Y_{11}^+ + \alpha Y_{22}^+ + Y_{12}) \tag{5}$$

$$Y_{ii}^+ = \begin{cases} Y_{ii} & \text{si } \sigma_{ii} > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{6}$$

$$d_{12}^s = \min \left( 1, \left\langle \frac{\sqrt{\underline{Y}} - \sqrt{Y_0}}{\sqrt{Y_{12}^c} - \sqrt{Y_0}} \right\rangle_+ \right) \tag{7}$$

Un effet retard est introduit pour limiter la dépendance des résultats au maillage [1].

### 3 Applications

Le modèle comportemental décrit ci-dessus a été implanté dans le logiciel Metafor, un code éléments finis grandes déformations, implicite/explicite, développé dans le service MN2L de l'Université de Liège. Des simulations ont été réalisées pour, d'une part, valider le modèle matériau et d'autre part, pour étudier l'endommagement d'un laminé suite à un impact d'énergie fixée (Fig. 1). Etant donné les difficultés rencontrées pour l'identification des paramètres, des analyses de sensibilité ont été réalisées pour quantifier le niveau d'incertitude sur les résultats, notamment dans le cadre des simulations d'impacts.

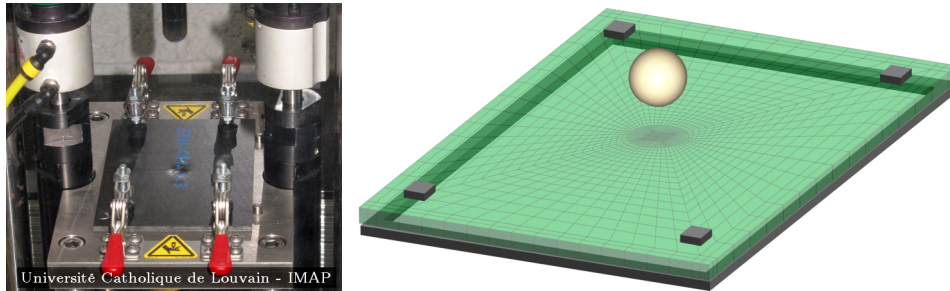


Fig. 1 - Dispositif expérimental pour les essais d'impacts sur une plaque de laminé (à gauche) et modèle éléments finis utilisé pour la simulation du test (à droite).

### Références

- [1] 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, 1177-1191, 2003.
- [2] O. Allix, P. Ladevèze. *Interlaminar interface modeling for the prediction of laminate delamination*, Composite Structures, vol. 22, 235-242, 1992.
- [3] C. Bordreuil, C. Hochard. *Finite element computation of woven ply laminated composite structures up to rupture*. Applied Composite Materials, vol. 11, 127-143, 2004.
- [4] P. Ladevèze, E. Le Dantec. *Damage modelling of the elementary ply for laminated composites*, Composites Science and Technology, vol. 43, 257-267, 1992.