

Prediction des propriétés mécaniques des composites Carbone-Epoxy à partir des propriétés des constituants et d'un modèle micro-mécanique

Prediction of mechanical properties of Carbone-Epoxy composites based on constituents properties and micro-mechanical model

Pierre-Yves Mechin¹, Vincent Keryvin²

1 : Dassault-Systèmes
10 rue Marcel Dassault, F- 78946 Vélizy-Villacoublay CS 40501
e-mail : pierreyves.mechin@3ds.com

2 : Université Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL
2 rue le Coat Saint Haouen, F-56100 Lorient
e-mail : vincent.keryvin@univ-ubs.fr

Résumé

La résistance en compression est une propriété essentielle des composites carbone-epoxy utilisés dans le nautisme de compétition. La variabilité des résultats obtenus en fonction des résines utilisées témoigne de l'importance d'une prédiction précise de l'influence des propriétés des constituants. Il est proposé d'utiliser un modèle multi-échelle pour prédire le comportement en cisaillement du pli à 0° qui est par la suite utilisé dans un modèle analytique permettant la prédiction de la résistance en compression. Le modèle multi-échelle est un volume élémentaire représentation (VER) hexagonal dont les propriétés des constituants (fibre/résine) sont obtenues par des caractérisations expérimentales. Le cisaillement UD généré et la résistance en compression calculés sont comparés aux résultats expérimentaux de tests 'In-Plane Shear' (IPS) et essais de flexion 4 points.

Abstract

Compressive strength is an essential property of carbon-epoxy composites used in competitive boating. The variability of the results obtained according to the resins used testifies to the importance of a precise prediction of the influence of the properties of the constituents. It is proposed to use a multi-scale model to predict shear behavior of the 0° fold which is subsequently used in an analytical model for prediction of compressive strength. The multi-scale model is a hexagonal elementary volume (VER) whose constituent properties (fiber / resin) are obtained by experimental characterizations. The calculated UD shear and computed compressive strength are compared to the experimental In-Plane Shear (IPS) and 4-point bend test results.

Mots Clés : Multi-échelle, Compression, rupture par bande en genou, test traction résine, propriétés fibres, VER

Keywords : Multi-scale, compression, kinking band failure, resin tension test, fiber properties, RVE

1. Introduction

Les composites sont des matériaux de premier choix pour les structures nécessitant de hautes performances mécaniques. Ils sont à ce titre très largement employés dans le nautisme de compétition. Dans ce domaine particulièrement, les différentes parties structurelles sont réalisées en composites Carbone-Epoxy (les systèmes de résine pouvant changer selon les performances attendues). On notera parmi-elles les plateformes (coques et bras de liaisons), les mats, les safrans et foils (Fig. 1). L'ensemble de ces structures sont soumises à des efforts de flexion. Ainsi, une partie de la structure est soumise à des contraintes de traction, une autre parties à des contraintes de compression. Les composites ont la particularité de présenter un comportement fortement dissymétrique entre traction

et compression. En traction, les fibres sont les plus sollicitées et portent la quasi totalité de la charge tandis qu'en compression, le micro-flambage des fibres est contenu par la résine, sa rigidité ayant une influence sur le micro-flambage. La rupture en compression est donc une rupture multi-échelle (bande en genou à l'échelle du pli contenue ou non par la rigidité de la résine et la stabilité de la fibre).



Fig. 1. Ultime 100 pieds Gitana sur ses foils (Source Gitana team - JB Epron)

Des études ont été menées depuis les années 1950 avec notamment les travaux de Rosen [1] qui émet l'hypothèse que la résistance en compression dépend du volume de fibres et de la rigidité en cisaillement du pli uni-directionnel (UD). Par la suite, Argon [2] propose une évolution avec la prise en compte d'un comportement élasto-plastique et du désalignement initial des fibres résultant du procédé de fabrication. En 1983, Budiansky [3] propose un modèle intégrant les travaux d'Argon et représentant le comportement de l'UD en cisaillement comme élastique purement plastique. Enfin, Budiansky & Fleck [4] établissent un modèle de micro-flambage intégrant un comportement non-linéaire de l'UD décrit par un modèle de Ramberg-Osgood. Ce modèle a fait l'objet de nombreux travaux d'identification [5, 6, 7] et de validation [8, 9]. A ceci vient s'ajouter un effet de structure qui dépend du gradient de déformation appliqué sur la structure, de la configuration de l'empilement (nombre de plis UD consécutifs), ainsi que la rigidité des plis voisins aux plis UD. Cette contribution a été largement présentée au cours des travaux des années 1990 [10, 11, 12] et soumise à une validation qualitative [13].

L'utilisation de ces modèles requiert un certain nombre de paramètres qui nécessitent une expérimentation rigoureuse [9]. Toutefois, en s'appuyant sur les propriétés mécaniques des constituants (fibre & résine), il est possible de prédire les performances mécaniques du pli, notamment en cisaillement non-linéaire. Cette étude propose donc une caractérisation de la résistance en compression d'un couple fibre/résine à partir des propriétés mécaniques des constituants et d'un modèle multi-échelle basé. La représentativité de cette approche est-elle satisfaisante pour une prédiction précise ?

Il est proposé de répondre à cette problématique de la manière suivante. Tout d'abord les expérimentations ou identifications des paramètres des constituants sont définies. Ces paramètres sont alors introduits dans un modèle multi-échelle également présenté. Les prédictions numériques sont alors comparées à des résultats expérimentaux du comportement en cisaillement de l'UD. Enfin, à partir du cisaillement décrit, la prédiction de la résistance en compression de ce couple fibre/résine est réalisée. Une comparaison avec des résultats expérimentaux en compression & flexion est soumise. Les résultats sont discutés et des perspectives d'amélioration sont suggérées.

2. Caractérisation des constituants

2.1. Propriétés de la résine

La résine est un matériau considéré comme isotrope. La résine utilisée est une résine Se84 LV (Gurit) dont la température de transition vitreuse (T_g) est de 98°C. La caractérisation du comportement de la résine est réalisé à l'aide d'un essai de traction (norme ISO 527-2 [14]). Les propriétés élastiques sont mesurées avec une machine de test (Instron 5567, Cellule de charge de 10 kN). Les déformations longitudinales et transversales sont mesurées avec un système optique 3D (Aramis 5M, GM, Allemagne). Deux caméras (niveau de gris de 8 bits, 2050 x 2448 pixels, images à 2Hz) sont utilisées pour enregistrer les déplacements sur un mouchetis de gris peint à la surface de l'échantillon, au moyen d'une méthode de corrélation d'image. 5 éprouvettes haltères sont testés ($25 \times 5 \times 2 \text{ mm}^3$) à une vitesse de 1 mm/min. Le comportement non-linéaire, dans la partie avant le pic de contrainte, est décrit par une loi de Ramberg-Osgood (Eq. 1) :

$$E_m * \epsilon_l = \sigma + \frac{3}{7} * \left(\frac{|\sigma|}{S_m^0} \right)^{n_m-1} * \sigma \quad (\text{Eq. 1})$$

E_m (module de Young), S_m^0 et n_m sont les paramètres de Ramberg-Osgood et ϵ_l et σ sont la déformation longitudinale et la contrainte de traction, respectivement.

Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 1.

| Résine | E_m [GPa] | ν_m - | G_m [GPa] | n_m - | S_m^0 [MPa] |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Se84 LV | 3.49 ± 0.06 | 0.40 ± 0.01 | 1.24 ± 0.01 | 2.83 ± 0.01 | 89.3 ± 1.2 |

Tab. 1. Résultats expérimentaux obtenus sur la résine Se84 LV (Gurit) par un essai de traction (UBS 2018).

2.2. Propriétés de la fibre

Le comportement de la fibre est anisotrope et sera décrit par une isotropie transverse. La fibre utilisée est une fibre HR40 (Mitsubishi). Ainsi, les propriétés suivantes doivent être identifiées : E_{fl} pour le module longitudinal de la fibre, E_{ft} pour le module transverse de la fibre, G_{flt} pour le module de cisaillement plan, G_{ft} le module de cisaillement transverse et les coefficients de poisson associés dans les différentes directions. Le module axial des fibres E_{fl} est mesuré par des essais de traction sur les fibres individuelles selon la norme ASTM [15]. Le module transverse (E_{ft}) est identifié à partir de résultats de la littérature [16]. Le module de cisaillement plan (G_{flt}) est identifié à partir de la littérature [17]. Le module de cisaillement transverse (G_{ft}) est calculé considérant l'isotropie transverse ($G_{ftt} = \frac{E_{ft}}{2(1 + \nu_{ft})}$)

| Propriété | Valeur | Unité | Source |
|-------------|--------------|-------|---------------|
| E_{fl} | 361 ± 51 | GPa | Mesure exp. |
| E_{ft} | 8.0 | GPa | Documentation |
| G_{flt} | 24 | GPa | Documentation |
| G_{ft} | 3.33 | GPa | Calculé |
| ν_{flt} | 0.226 | - | Documentation |
| ν_{ft} | 0.201 | - | Documentation |

Tab. 2. Résultats obtenus ou identifiés sur la fibre HR40 (Gurit).

3. Modèle numérique multi-échelle

La représentation de la micro-structure d'un composite uni-directionnel est complexe par la répartition aléatoire des fibres dans la résine. Toutefois, il est possible de dégager des motifs répétitifs représentatifs de cette microstructure : les volumes élémentaires représentatifs (VER). On en notera ici deux principaux le modèle hexagonal et le modèle carré. Le modèle hexagonal présente l'avantage d'offrir une isotropie transverse représentative de la physique du composite. C'est le modèle retenu pour cette étude (Fig. 2).

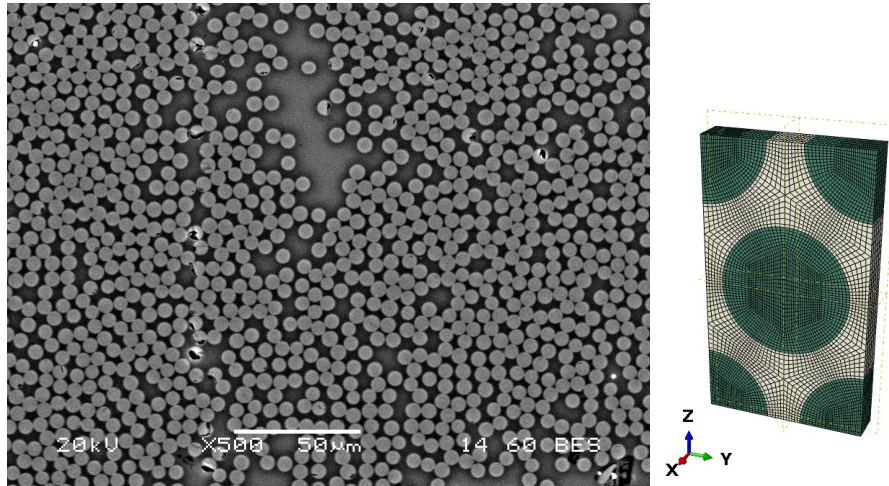


Fig. 2. Visualisation de la microstructure du composite (a) et du VER Hexagonal utilisé dans cette étude (b).

Ce travail de prédiction du comportement en cisaillement de l'UD a été décrit et réalisé par Sun [18]. Le calcul est réalisé sur Abaqus CAE 6.17 (Dassault-Systèmes) et l'utilisation d'un plug-in Micromechanics (3DExperience SIMULIA Community). Le plug-in génère le modèle hexagonal selon les caractéristiques fournies (diamètre de fibre et volume de fibres) en créant des éléments volumiques linéaire (C3D8). Les éléments de chaque type de matériaux se voient attribuer les propriétés mécaniques précédemment identifiées. Les conditions de périodicité sont introduites par le plug-in comme décrit par Lejeunes & Bourgeois [19]. Le chargement d'un cisaillement plan pur est introduit (déformation de cisaillement plan γ_{12}).

4. Résultats et discussions

Les résultats obtenus en cisaillement sont tracés sur la figure 3. On peut constater que la convergence des résultats est bonne entre la simulation numérique et les mesures expérimentales réalisées sur les tests traction $\pm 45^\circ$ pour des déformations comprises entre $[0; 0.7\%]$. Au delà de 0.7% , on peut constater que les simulations et mesures expérimentales présentent quelques écarts. La simulation présente un comportement plus raide que le comportement réel observé expérimentalement.

Les résultats du comportement en cisaillement sont utilisés pour extraire les paramètres d'un fit Ramberg-Odgood (cf. tableau 3). Le désalignement initial est choisi à $\phi_0 = 1.8^\circ$ (valeur correspondant à deux fois la déviation standard de la distribution du désalignement [9], soit 5% des fibres les plus désalignées qui entraînent la formation de la bande en genou). Les données obtenues sont utilisées dans le modèle analytique proposé par Budiansky et Fleck [4] de micro-flambage de la fibre donné par l'équation Eq. 2, relation entre la déformation de cisaillement (γ) et la contrainte de cisaillement plan (τ).

$$\frac{\gamma}{\gamma_{UD}^y} = \frac{\tau}{\tau_{UD}^y} + \frac{3}{4} \times \left(\frac{\tau}{\tau_{UD}^y} \right)^{n_{UD}} \quad (\text{Eq. 2})$$

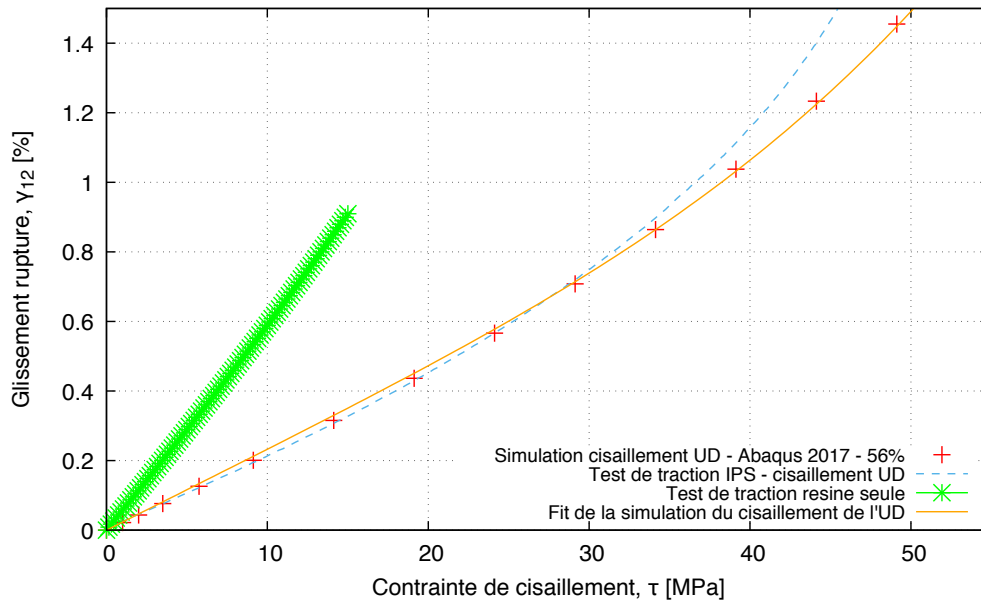


Fig. 3. Courbe de comportement en cisaillement : le comportement non-linéaire de la résine issu de l'essai de traction (verte), la simulation réalisée avec le VER dans Abaqus (rouge), le fit extrait de la simulation (orange) et le comportement expérimental de l'UD en cisaillement (bleu).

γ_{UD}^y , n_{UD} , G_{UD} sont les paramètres de Ramberg-Osgoog en cisaillement plan de l'UD et $\tau_{UD}^y = G_{UD} \times \gamma_{UD}^y$.

| Propriété | Valeur | Unité |
|-----------------|--------|-------|
| G_{UD} | 4520 | GPa |
| n_{UD} | 4.8 | - |
| γ_{UD}^y | 1.14 | % |

Tab. 3. Propriétés de l'UD en cisaillement extraits du fit de la simulation numérique.

À cela vient s'ajouter la contribution liée à l'effet de structure (cf. [9] pour l'équation afférente). Les données de la matrice sont issues de l'essai de traction matrice, le diamètre de la fibre a été obtenue par des mesures microscopiques ($\phi_f = 6.07 \pm 0.27 \mu\text{m}$ - [9]). La rigidité de la fibre est issue d'essais de traction sur fibres unitaires. L'ensemble de ces paramètres est utilisé pour la contribution de l'effet de structure. L'ordre de grandeur de la contribution de l'effet de structure est de l'ordre de 10% de la contribution du mécanisme de micro-flambage de la fibre. Les prédictions de la compression sont comparées à des résultats expérimentaux de flexion 4 points réalisés selon la norme ASTM [20]. Les empilements réalisés sont proposés comme suit : (+45° / [0°]₉ / -45° / [0°]₁₁ / +45° / [0°]₉ / +45°). L'ensemble des plis sont des plis HR40 / Se84 LV, d'un grammage de 300gr par pli. Ces échantillons sont réalisés en autoclave avec un procédé de fabrication comme suggéré par les fiches constructeurs de Gurit.

L'ensemble des résultats expérimentaux et prédictions sont résumés sur la tableau 4).

| Méthode | Résistance en compression |
|---------------------------------|---------------------------|
| $\sigma_{UD}^{\text{rupt,exp}}$ | 1250 ± 50 MPa |
| $\sigma_{UD}^{\text{rupt,num}}$ | 1260 MPa |

Tab. 4. Comparatif des valeurs de résistance en compression obtenues expérimentalement et les prédictions associées par le modèle analytique.

5. Conclusion

Dans cette étude est proposée une prédiction de la résistance en compression en utilisant un modèle analytique comprenant une partie correspondant au mécanisme de micro-flambage (Budiansky & Fleck) et une partie correspondant à l'effet de structure (Grandidier & Drapier). Les prédictions requièrent d'identifier notamment le comportement en cisaillement de l'UD. Ceci est réalisé à partir des propriétés des constituants (fibre & résine) et d'un modèle micro-mécanique hexagonal pour prédire le comportement en cisaillement de l'UD. Cette prédiction, comparée au comportement expérimental obtenu dans un essai de traction sur un empilement $\pm 45^\circ$ a montré une bonne convergence des résultats. A partir des données mesurées sur le cisaillement de l'UD, la résistance en compression est prédite puis comparée à des résultats obtenus lors d'essais de flexion 4 points monolithiques. Ces comparaisons ont également montré une bonne convergence.

6. Perspectives

Des perspectives d'amélioration sont envisagées. Les plupart des propriétés de la fibre sont issues de données la littérature. Les valeurs extraites qui sont elles-mêmes issues d'estimations ou d'identifications sur des modèles multi-échelles. Il conviendra donc par la suite de s'intéresser à l'influence des différentes propriétés de la fibre sur le comportement en cisaillement (module de cisaillement de la fibre, module transverse, coefficient de poisson, ...). Cette influence peut être observée par la mise en place d'une optimisation multi-échelle s'appuyant sur les données connues à l'échelle du pli et les propriétés de la fibre identifiée expérimentalement.

D'un autre côté, le travail d'homogénéisation est fait sur un VER hexagonal qui ne représente pas l'influence de l'arrangement réel des fibres. Il serait à entreprendre par la suite des simulations équivalentes avec un VER présentant un certain nombre de fibres réparties aléatoirement.

Remerciements

Les auteurs remercient Tom Chatterley et Kevin Cadd pour leur aide précieuse dans la compréhension des matériaux Gurit et la fourniture des matériaux pour la réalisation des essais. Les auteurs remercient également François Portanguen & Hervé Bellegou pour leur contribution à la préparation des montages et l'outillage d'expérimentation.

Références

- [1] B. Rosen « Mechanics of composite strengthening », in : Fiber composite materials, seminar of the American society for metals, metals park, Ohio, American Society of Metals, Cleveland, Ohio, , pp. 39, 1965.
- [2] A. Argon « Treatise on Materials Science and Technology », in : Fracture of composites, chap. 4, Academy Press, New York, herman edn., , pp. 345, 1972.
- [3] B. Budiansky « Micromechanics », *Computers and Structures* Vol. 16 n° 1-4, pp. 3–12, 1983, ISSN 00457949.
- [4] B. Budiansky, N. Fleck « Compressive failure of fibre composites », *Journal of Mechanical Physics and solids* Vol. 41 n° 1, pp. 183–211, 1993.
- [5] N. A. Fleck, B. Budiansky « Compressive Failure of Fibre Composites Due to Microbuckling », *Inelastic Deformation of Composite Materials* , pp. 235–273, 1991.
- [6] B. Budiansky, N. Fleck, J. Amazigo « On kink-band propagation in fiber composites », *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* Vol. 46 n° 9, pp. 1637–1653, 1998, ISSN 00225096.
- [7] B. Budiansky, N. Fleck « Compressive kinking of fiber composites : a topical review », *Part of Mechanical USA 1994* Vol. 47 n° 6.
- [8] P. M. Jelf, N. A. Fleck « Compression Failure Mechanisms in Unidirectional Composites », 1992.
- [9] P.-Y. Mechin, V. Keryvin, J.-C. Grandidier, D. Glehen « An experimental protocol to measure the parameters affecting the compressive strength of CFRP with a fibre micro-buckling failure criterion », *Composite Structures* Vol. 211, ISSN 02638223.
- [10] S. Drapier, C. Gardin, J.-C. Grandidier, M. Potier-ferry « Structure effect and microbuckling », *Composites Science and Technology* Vol. 56 n° 96, pp. 861–867, 1996.

- [11] S. Drapier, J.-C. Grandidier « A non-linear numerical approach to the analysis of microbuckling », *Composites Science and Technology* Vol. 58 n° 97, pp. 785–790, 1998.
- [12] C. Jochum, J.-C. Grandidier « Microbuckling elastic modelling approach of a single carbon fibre embedded in an epoxy matrix », *Composites Science and Technology* Vol. 64 n° 16, pp. 2441–2449, 2004, ISSN 02663538.
- [13] J.-C. Grandidier, P. Casari, C. Jochum « A fibre direction compressive failure criterion for long fibre laminates at ply scale, including stacking sequence and laminate thickness effects », *Composite Structures* Vol. 94 n° 12, pp. 3799–3806, 2012, ISSN 02638223.
- [14] ISO « ISO 527-2 : Plastics - Determination of tensile properties - Part 2 Test conditions for moulding and extrusion plastics », 1996.
- [15] ASTM « ASTM D3379-75(1989)e1 - Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High Modulus Single-Filament Materials », 1998.
- [16] M. K. Ballard, W. R. McLendon, J. D. Whitcomb « The influence of microstructure randomness on prediction of fiber properties in composites », *Journal of Composite Materials* Vol. 48 n° 29, pp. 3605–3620, 2014, ISSN 0021-9983.
- [17] M. Ishikawa, Y. Kogo, J. Koyanagi, F. Tanaka, T. Okabe « Torsional modulus and internal friction of polyacrylonitrile- and pitch-based carbon fibers », *Journal of Materials Science* Vol. 50 n° 21, pp. 7018–7025, 2015, ISSN 0022-2461.
- [18] W. SUN, Z. GUAN, Z. LI, M. ZHANG, Y. HUANG « Compressive failure analysis of unidirectional carbon/epoxy composite based on micro-mechanical models », *Chinese Journal of Aeronautics* Vol. 30 n° 6, pp. 1907–1918, 2017, ISSN 10009361.
- [19] S. Lejeunes, S. Bourgeois « Une Toolbox Abaqus pour le calcul de propriétés effectives de milieux hétérogènes », in : 10ème colloque national en calcul des structures, CSMA, Presqu'île de Giens, , pp. 1–9, 2011.
- [20] ASTM « D6272 - Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending », 2008.