



HAL
open science

Rupture des composites en compression sens fibre et effet de l'endommagement

G Eyer, O Montagnier, C Hochard, J-P Charles

► **To cite this version:**

G Eyer, O Montagnier, C Hochard, J-P Charles. Rupture des composites en compression sens fibre et effet de l'endommagement. Congrès français de mécanique, Aug 2015, Lyon, France. hal-01308015

HAL Id: hal-01308015

<https://hal.science/hal-01308015>

Submitted on 27 Apr 2016

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.

Rupture des composites en compression sens fibre et effet de l'endommagement

G. Eyer^a, O. Montagnier^{a,b}, C. Hochard^{a,c}, J-P. Charles^{a,c}

a. Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, 31 chemin Joseph-Aiguier 13402 Marseille cedex 20. E-mail : eyer@lma.cnrs-mrs.fr

b. Centre de recherche de l'Armée de l'air (CReA) – EOAA, Base Aérienne 701, 13661 Salon Air.

c. Aix-Marseille Université, 60 Rue Frédéric Joliot Curie, 13013 Marseille.

Résumé étendu

1 Introduction

Le dimensionnement des structures composites passe par des modèles numériques toujours plus complexes dont la qualité découle de la capacité à reproduire le comportement du matériau. Pour les composites stratifiés, le comportement en compression dans la direction des fibres s'avère complexe et reste encore mal connu. Une des principales difficultés pour ce type de sollicitation est le lien entre la partie expérimentale, la mise en place des modèles et leur validation.

Il a déjà été montré pour des sollicitations de traction que l'augmentation de l'endommagement transverse avait pour conséquence de diminuer la résistance du pli [1]. Il est pressenti que l'endommagement joue un rôle d'autant plus important pour la compression. Lorsque la résine est intégralement endommagée, l'éclatement des fibres mène à leur flambage immédiat, ce qui implique une rupture catastrophique du pli. Il a été montré [2] que l'augmentation de la température (ce qui s'apparente à un endommagement de la matrice) entraînait une chute de la résistance en compression pour des composites verre/polypropylène. Et lorsque la température atteint le seuil de transition vitreuse, le pli présente une résistance quasi-nulle.

Nombre de modèles *micros* visent à décrire la rupture du pli en compression, notamment *via* l'introduction des modèles à bandes de glissement (*kink-band*) [3, 4, 5]. Ces modélisations se complètent avec la mécanique de l'endommagement [5, 6]. Il reste cependant difficile d'évaluer la qualité de ces modèles puisque les expérimentations sont peu nombreuses. Il est en effet observé [3, 4, 7] que

c'est une instabilité à l'échelle des fibres qui est la cause de la rupture du pli (figure 1). L'état de l'art actuel stipule que le microflambage élastique intervient en premier lieu au voisinage d'une imperfection (amas de résine, fibre rompue, etc...). Ensuite l'état post-flambé des fibres engendre des déformations trop importantes pour les fibres qui finissent par se rompre. Cela génère donc ensuite des bandes de glissement (*kink-band*). Ces modélisations permettent d'accéder directement à la contrainte ultime en compression à partir de formules analytiques, résumées dans le tableau 1.

Rosen [7]	Micro-flambage élastique de fibres	$\sigma_{min} = \frac{E_{22}}{1-\nu_f}$
Budiansky [3]	Micro-flambage plastique et bandes de glissement	$\sigma_{min} = \frac{E_{22}}{1+\frac{\bar{\phi}}{\gamma_Y}}$

où $\bar{\phi}$ représente le désalignement des fibres, γ_Y la limite élastique de la matrice et ν_f le taux de fibres.

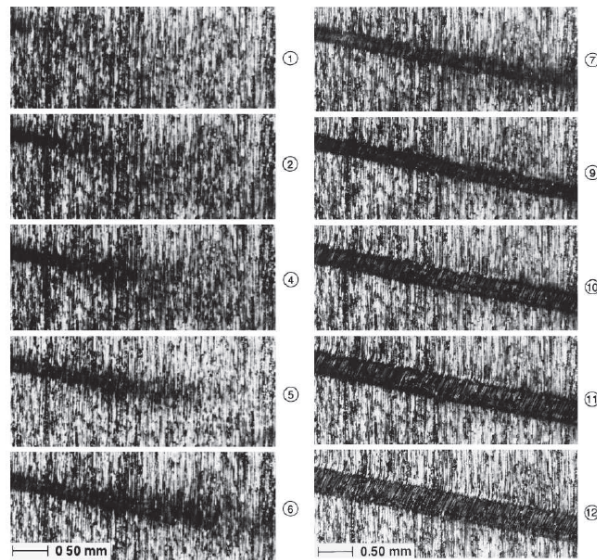
TABLE 1 – Récapitulatif des modèles analytiques

Partant du modèle de Rosen [7], il apparaît que la résistance en compression sens fibre est affectée linéairement par la rigidité de la matrice. Et selon Ladevèze et Le Dantec [8], la rigidité de la matrice est proportionnelle à l'endommagement. Cela signifie donc que, selon ces modèles, la résistance en compression serait proportionnelle à l'endommagement.

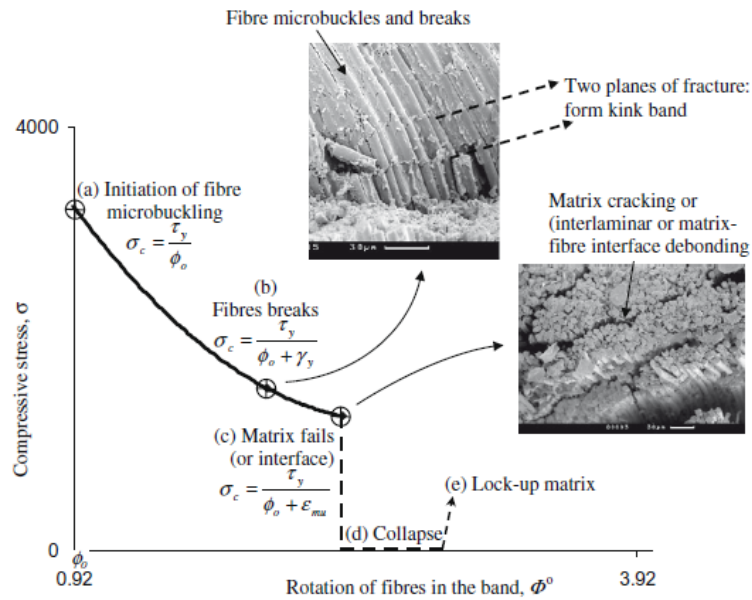
C'est dans ce cadre que nous proposons une étude expérimentale qui met en évidence le rôle de l'endommagement transverse dans la rupture en compression sens fibre.

Le choix d'un essai n'est pas anodin et mène à la réflexion. Le montage prévu par la norme (ASTM D 3410/A et EN ISO 14126) est l'essai Celanese qui est utilisé dans de nombreuses publications [9, 10, 11]. L'avantage principal de cet essai est la géométrie particulièrement simple des éprouvettes et l'accès trivial au champ de contraintes dans l'éprouvette. Cependant les résultats présentent une variabilité importante notamment du fait d'une structure qui est très propice au flambage et qui possède une concentration de contraintes importante au niveau de l'encastrement [9]. Dans le but de palier à ces défauts, certaines équipes tentent de modifier la géométrie de l'éprouvette [11, 12] ou d'équiper le montage d'un dispositif externe, dit « anti-flambage » [2, 13]. Malgré ces améliorations les résultats concernant la déformation à rupture restent quantitativement de qualité médiocre avec une variabilité importante.

Une autre piste pour caractériser le comportement en compression est d'étudier la face comprimée des essais de flexion, connus pour offrir une meilleure stabilité. Dans cet esprit, on retrouve les essais de flexion 3 points [14], les essais



(a) Apparition d'une *kink-band*



(b) Processus de rupture en compression

FIGURE 1 – Processus physiques liés à la rupture en compression sens fibre dans les composites

de flexion 4 points [15, 16, 17, 18] et les essais de flexion pure [9]. Les essais de flexion avec points d'appuis présentent deux points négatifs :

- le calcul de l'état de contrainte à partir de l'effort nécessite un calcul inverse complexe lié au grand déplacement de l'éprouvette,
- les points d'appuis peuvent conduire à une rupture prématurée de l'éprouvette.

L'essai de flexion pure [9] a été mis en place dans le but de contourner ces difficultés. Le suivi de l'essai à moment imposé permet un passage simple du moment de flexion à la contrainte de compression. De plus, les effets de bords restent très éloignés de la zone utile de l'éprouvette, ce qui perturbe la mesure au minimum. Ce type d'essai permet d'obtenir des déformations à rupture très importantes (jusque 1,8 % pour un unidirectionnel K63712).

Dans le même esprit, on retrouve les essais de flambage rotulé [19] qui permettent aussi d'atteindre des déformations à rupture très importantes. Le problème de ces essais est la difficulté à relier l'effort imposé à la contrainte dans la zone utile.

Ces essais mettent en jeu un phénomène de structure complexe lié au gradient de déformation dans l'épaisseur de l'éprouvette [20, 19, 14]. Pour cette raison, ce type d'essai sera écarté afin de focaliser notre attention sur des sollicitations de compression pure qui restent plus simples à dépouiller. Cependant, l'instabilité des essais de compression les rend extrêmement sensibles aux effets de structure et aux imperfections, c'est pour cette raison que le suivi des expériences est effectué par corrélation d'images. La mesure du champ de déformations permet de visualiser les effets locaux qui perturbent la mesure et conduisent à une rupture précipitée de l'éprouvette.

Compte-tenu de cette analyse des techniques expérimentales existantes, il a été décidé de réaliser les essais sur des tubes en forme d'haltère en tissu carbone/epoxy (figure 2). Ce type d'essai a déjà été validé par le passé [21, 6, 22]. Il a en effet été montré qu'il permet une mesure fiable de la résistance en compression en s'affranchissant des effets de structure parasites (rupture dans les mors, concentrations de contraintes, flambage de l'éprouvette...). L'essai se scinde en deux étapes principales (figure 3). Durant l'étape ❶, l'éprouvette tubulaire est soumise à un chargement cyclique de torsion. Ce chargement permet de faire travailler la matrice et donc de l'endommager. Un pilotage adéquat permet d'atteindre des endommagements importants. Plusieurs tubes sont donc réalisés afin d'obtenir des endommagements différents. Suite à cette étape, un travail nécessaire consiste à aligner les fibres dans la direction de la sollicitation de compression. Cette étape est réalisée par un chargement statique de torsion et contrôlée par corrélation d'images. Ensuite, l'étape ❷ peut débuter. Il s'agit ici de réaliser un simple essai de compression sur tube. Le protocole d'essai a déjà été validé et présenté dans [6]

Les résultats de ces expériences sont synthétisés sur la figure 4. Il apparaît

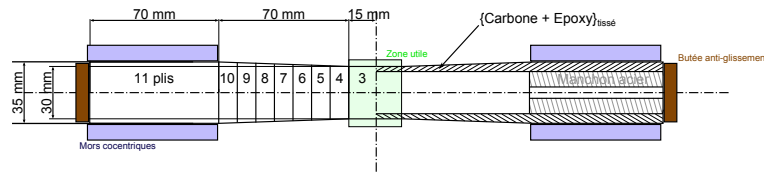


FIGURE 2 – Éprouvette choisie pour l'étude de l'endommagement sur la résistance en compression sens fibre

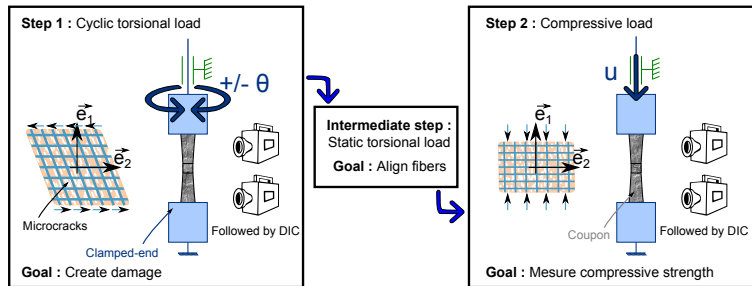
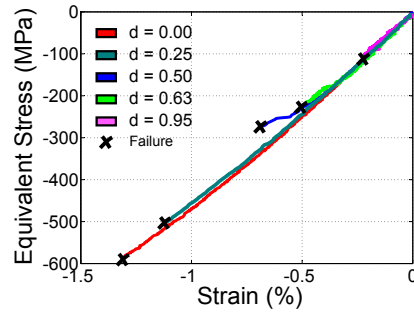


FIGURE 3 – Protocole de mesure pour quantifier l'effet de l'endommagement sur la rupture en compression sens fibre

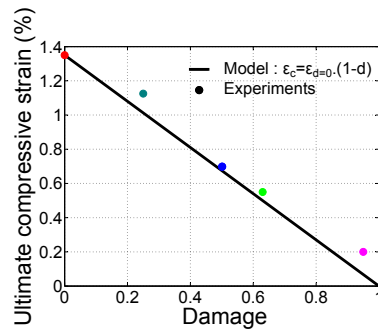
d'une part que le comportement en compression sur une éprouvette saine est significativement non-linéaire. Cette non-linéarité a déjà été observée par de nombreux auteurs [15, 23, 24, 25] et provient essentiellement du comportement non-linéaire des fibres de carbone. Une modélisation efficace est proposée par [15] et concorde bien avec nos mesures. Lorsque l'endommagement est introduit dans les éprouvettes, il apparaît que le comportement en terme de rigidité n'est pas affecté. Cela s'explique simplement par le fait que la rigidité est portée quasi-exclusivement par les fibres. Si celles-ci ne sont pas rompues, la rigidité n'est pas modifiée.

Cependant la baisse de résistance en fonction de l'endommagement est clairement mis en évidence. Il est bien visible que plus l'endommagement est important, plus la résistance est faible. Cela concorde bien avec la prédiction effectuée par Rosen [7] qui postulait sur un micro-flambage élastique des fibres. Ce micro-flambage élastique des fibres est proportionnel à la rigidité de la matrice (c'est-à-dire proportionnel à l'endommagement). La figure 4b présente le modèle linéaire utilisé pour décrire la baisse de résistance en fonction de l'endommagement. Ce critère de rupture s'écrit donc de la manière suivante :

$$\text{Il y a rupture en compression si : } \quad \varepsilon < \varepsilon_{min}^d \quad \text{où} \quad \varepsilon_{min}^d = \varepsilon_{min}^{d=0} \cdot (1 - d) \quad (1)$$



(a) Comportement en compression



(b) Déformation à rupture en compression

FIGURE 4 – Effet de l'endommagement sur le comportement en compression sens fibre

Ce résultat offre des applications intéressantes en vue de la meilleure compréhension de la tenue mécanique des stratifiés. Cette baisse de résistance n'est, selon notre connaissance de la littérature, jamais prise en compte lors du dimensionnement des structures composites. Il apparaît cependant que pour certains empilements, une sollicitation de traction peut générer des contraintes négatives dans certains plis. Ces plis pouvant être très fortement endommagés [26]. Cette perspective sur le dimensionnement des stratifiés sera détaillée lors de la présentation orale.

Références

- [1] Yannick Thollon. *Analyse du comportement à rupture de composites stratifiés constitués de plis tissés sous chargements statique et de fatigue*. PhD thesis, 2009.
- [2] A.G. Gibson, M.E. Otheguy Torres, T.N.A. Browne, S. Feih, and A.P. Mouritz. High temperature and fire behaviour of continuous glass fibre/polypropylene laminates. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 41(9) :1219–1231, September 2010.
- [3] B. Budiansky and N. A. Fleck. Compressive failure of fibre composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 41(1) :183–211, 1993.
- [4] S. Kyriakides, R. Arseculeratne, J. Perry, and K. M. Liechti. On the compressive failure of fiber reinforced composites. *International journal of solids and structures*, 32(6-7) :689–738, 1995.
- [5] N. Feld, O. Allix, E. Baranger, J. M. Guimard, et al. A micromechanics-based mesomodel for unidirectional laminates in compression. In *Proceedings of the 3rd ECCOMAS Thematic Conference on the Mechanical Response of Composites*, page 61–68, 2011.
- [6] G. Eyer, O. Montagnier, J-P. Charles, and C. Hochard. Effect of transverse damage on compressive strength in fiber direction for cfrp. In *ECCM Seville*, 2014.
- [7] B. W. Rosen. Mechanics of composite strenghtening. In *Fibre Composite Materials*, American Society for metals, pages 37–75. 1964.
- [8] P Ladeveze and E Ledantec. Damage modelling of the elementary ply for laminated composites. *Composites Science and Technology*, 43(3) :257–267, 1992.
- [9] O. Montagnier. *Tubes composites à grande vitesse de rotation : analyse expérimentale et modélisation*. PhD thesis, Provence, Marseille, 2005.
- [10] A. Jumahat, C. Soutis, F.R. Jones, and A. Hodzic. Fracture mechanisms and failure analysis of carbon fibre/toughened epoxy composites subjected to compressive loading. *Composite Structures*, 92(2) :295–305, January 2010.
- [11] Mahmood M. Shokrieh and Majid Jamal Omid. Compressive response of glass–fiber reinforced polymeric composites to increasing compressive strain rates. *Composite Structures*, 89(4) :517–523, August 2009.
- [12] J. Lee and C. Soutis. A study on the compressive strength of thick carbon fibre–epoxy laminates. *Composites science and technology*, 67(10) :2015–2026, 2007.

-
- [13] N. A. Fleck. Compressive failure of fiber composites. *Advances in applied mechanics*, 33, 1997.
 - [14] J.-C. Grandidier, P. Casari, and C. Jochum. A fibre direction compressive failure criterion for long fibre laminates at ply scale, including stacking sequence and laminate thickness effects. *Composite Structures*, 94(12) :3799–3806, December 2012.
 - [15] O Allix, P Ladevèze, and E Vittecoq. Modelling and identification of the mechanical behaviour of composite laminates in compression. *Composites Science and Technology*, 1994.
 - [16] N.V. De Carvalho, S.T. Pinho, and P. Robinson. An experimental study of failure initiation and propagation in 2D woven composites under compression. *Composites Science and Technology*, 71(10) :1316–1325, July 2011.
 - [17] P Ladeveze, Y. Remond, and E. Vittecoq. Essais mécaniques sur composites à hautes performances : difficultés et critères de validité. *Bulletin S.F.M.*, 1989.
 - [18] S.T. Pinho, P. Robinson, and L. Iannucci. Developing a four point bend specimen to measure the mode I intralaminar fracture toughness of unidirectional laminated composites. *Composites Science and Technology*, 69(7-8) :1303–1309, June 2009.
 - [19] M. R. Wisnom and J. W. Atkinson. Constrained buckling tests show increasing compressive strain to failure with increasing strain gradient. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 28(11) :959–964, 1997.
 - [20] S. Drapier, C. Gardin, J. C. Grandidier, and M. Potier-Ferry. Structure effect and microbuckling. *Composites science and technology*, 56(7) :861–867, 1996.
 - [21] G. Eyer, O. Montagnier, J-P. Charles, and C. Hochard. Effet de l'endommagement transverse sur la résistance en compression sens fibre d'un composite carbone/époxy. In *Journées Nationales des composites*, 2013.
 - [22] G. Eyer, O. Montagnier, J-P. Charles, and C. Hochard. Fatigue damage and fiber failure. In *ICFC Paris*, 2015.
 - [23] O. Allix, P Ladeveze, E. Vittecoq, and H. Girard. Composites 2D à fibres haute résistance : caractérisation du comportement de compression. 1984.
 - [24] N. Feld. *Vers un pont micro-meso de la rupture en compression des composites stratifiés*. PhD thesis, ENS CACHAN, Cachan, 2011.
 - [25] N.V. De Carvalho, S.T. Pinho, and P. Robinson. Analytical modelling of the compressive and tensile response of woven composites. *Composite Structures*, 94(9) :2724–2735, September 2012.
 - [26] J. Tong, F.J. Guild, S.L. Ogin, and P.A. Smith. On matrix crack growth in quasi-isotropic laminates - I. experimental investigation. *Composites Sciences and Technology*, 1997.