

# Caractérisation et modélisation du comportement en compression de composites tissés 3D

## *Characterization and modeling of the compression behavior of 3D woven composites*

Y. El Archi<sup>1</sup>, JF. Maire<sup>2</sup>, S. Mousillat<sup>3</sup>, F. Rasselet<sup>3</sup>

1 : SAFRAN Composites  
33 rue de la gare, F-91760, Itteville  
e-mail : [youssera.el-archi@safrangroup.com](mailto:youssera.el-archi@safrangroup.com)

2 : DMAS, ONERA, Université Paris Saclay  
F-92322 Châtillon – France  
e-mail : [Jean-Francois.Maire@onera.fr](mailto:Jean-Francois.Maire@onera.fr)

3 : SAFRAN Aircraft Engines  
Département Mécanique des Matériaux et Composites, Site de Villaroche  
Rond-Point René Ravaud, 77 550 MOISSY-CRAMAYEL  
e-mail : [sylvain.mousillat@safrangroup.com](mailto:sylvain.mousillat@safrangroup.com) et [francois.rasselet@safrangroup.com](mailto:francois.rasselet@safrangroup.com)

### Résumé

Dans le but d'améliorer la compréhension du comportement des matériaux composites tissés 3D en compression en quasi-statique et en fatigue, deux campagnes d'essais ont été réalisées avec des instrumentations riches donnant accès à des propriétés qui ne sont pas mesurées lors d'essais de fatigue standards comme la déformation hors-plan. Ces mesures ont permis de conclure quant à l'importance de cette déformation sur la rupture en compression dans le plan et d'en déduire une stratégie de modélisation du comportement de ces matériaux qui est intrinsèquement multiaxial. Le modèle proposé se base sur le cadre de la mécanique continue de l'endommagement et se place dans la suite des modèles co-développés entre l'ONERA et SAFRAN.

### Abstract

In order to improve the understanding of the behavior of 3D woven composite materials in quasi-static and fatigue compression loadings, two experimental campaigns were carried out with rich instrumentation providing access to properties that are not measured during standard fatigue tests such as out-of-plane deformation. These measurements made it possible to conclude on the impact of this deformation on in-plane compression failure and to deduce a modeling strategy for the behavior of these materials which is intrinsically multiaxial. The proposed model is based on the framework of continuous damage mechanics and is placed in continuity with models co-developed between ONERA and SAFRAN.

**Mots Clés :** Compression, Fatigue, Endommagement, Composite Tissé 3D

**Keywords :** Compression, Fatigue, Damage, 3D Woven Composite

## 1. Introduction

Les matériaux composites tissés 3D à matrice polymère permettent de développer des structures de plus en plus légères et résistantes mécaniquement pour les applications aéronautiques, réduisant ainsi la consommation de carburant des avions et, par conséquent, les émissions de CO<sub>2</sub>. SAFRAN a

développé ce type de composites pour des applications dans les parties froides des moteurs d'avions en particulier les aubes FAN du moteur LEAP sont réalisées en tissées 3D. Néanmoins, les exigences mécaniques liées aux nouvelles architectures moteurs poussent à confronter les matériaux à des chargements de plus en plus complexes qui peuvent engendrer de la compression sur certaines parties des pièces tournantes. Afin d'améliorer la compréhension et la prévision du comportement mécanique des composites tissés 3D, il existe des modèles, tels que les modèles ODM (Onera Damage Model) où l'extension de ces modèles aux chargements de fatigue développée conjointement entre l'ONERA et SAFRAN est appelée modèle MOSCA. Ainsi de nombreuses études ont été menées afin de modéliser le comportement des composites tissés 3D en statique et en fatigue ([1], [2], [3], [4], [5]). Les modèles ODM consistent en une famille de lois adaptées au comportement endommageable des matériaux composites tissés avec différentes versions destinées aux composites à matrice organique ou aux composites à matrice céramique. La version actuelle est une formulation incrémentale appelée MOSCA et qui a pour vocation de simuler le comportement en statique et en fatigue de matériaux composites tissés 3D pour n'importe quel type de chargement en fonction du temps. Néanmoins Il existe assez peu de travaux sur la compression pour ce type de matériaux à l'exclusion des travaux d'A. Hurmane ([6]) pour des applications aux trains d'atterrissage composites. La formulation même des lois d'évolution des variables d'endommagement liées à ce modèle ne permet pas la description d'endommagement pour des chargements de compression (engendrant des déformations négatives, cf. [4] ou [5] pour la description de cette formulation). Cet aspect met en évidence deux problématiques techniques auxquelles ces travaux et les travaux à venir s'efforcent de répondre. La première problématique repose sur la nécessité de décrire une évolution progressive d'un endommagement en compression comme il est coutume de le faire en traction dans les modèles d'endommagement. Dans le but d'apporter des éléments de réponse, deux campagnes d'essais en compression fortement instrumentés ont été réalisées. La deuxième problématique réside dans le caractère intrinsèquement multiaxial d'un essai de compression sur tissé 3D à l'échelle mésoscopique mais aussi à l'échelle macroscopique, avec par effet Poisson, la création d'une déformation hors plan positive ( $\varepsilon_3 > 0$ ). La question posée est alors de retranscrire cet aspect sans trop alourdir le modèle phénoménologique.

## 2. Caractérisation du comportement en compression

Deux campagnes d'essais, en quasi-statique et en fatigue ont été réalisées dans le but d'améliorer la compréhension des mécanismes d'endommagement apparaissant en compression mais également dans l'optique d'enrichir les bases de données matériau pour des chargements nouveaux. Les deux campagnes d'essais ont été réalisées sur la même nuance matériau.

La première campagne a été réalisée par un laboratoire externe et était constituée d'essais de fatigue à différents rapports de charge (c'est-à-dire le rapport entre la contrainte minimale appliquée et la contrainte maximale) mais également à différentes orientations de prélèvement des éprouvettes par rapport au sens majoritaire des torons de chaîne. Le **Tableau 1** ci-dessous récapitule la nature des essais réalisés lors de cette première campagne ainsi que les rapports de charge associés. Pour chaque rapport de charge affiché, deux à trois niveaux différents de contrainte moyenne ont été testés le tout sur un nombre minimum d'éprouvettes représentatif de la dispersion des essais de fatigue.

Rapport de charge	Orientations testées	Nb essais
0,05	0°, 90°	10
-1	0°, 90°, 5°, 15°	11
10	0°, 90°, 5°, 15°	20
-0,25	0°, 90°	15

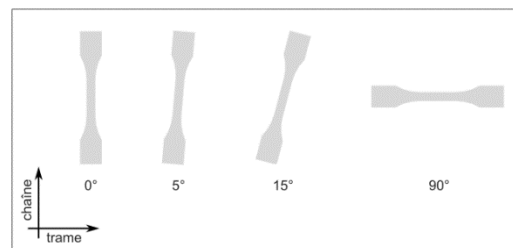


Tableau 1: Première campagne d'essais, rapports de charge et orientations testées

Figure 1: Illustration des orientations de prélèvement des éprouvettes

L'objectif de cette campagne était principalement d'enrichir nos bases de données matériau en générant de nouveaux admissibles pour des rapports de charges négatifs (traction-compression combinées) ou supérieurs à 1 (compression-compression). Néanmoins, sur certains essais, des instrumentations donnant une information locale ont été installées. En effet, sur un essai par configuration en moyenne un extensomètre optique a été déployé dans le but d'obtenir une mesure de la déformation au niveau de la zone utile de l'éprouvette. En plus de cela, un essai par configuration en moyenne (différent du dernier) a été instrumenté avec un système de corrélation d'images numériques (CIN) dans le but d'obtenir les champs complets de déformation sur le chant de l'éprouvette (y compris les déformations hors-plan).

La deuxième campagne d'essais combinait à la fois des essais en quasi-statique et des essais de fatigue. Cette deuxième campagne se concentrait davantage sur la compréhension des mécanismes d'endommagement apparaissant pour des chargements de compression pour confirmer sur ce matériaux les résultats obtenus par Antoine Hurmane ([6]). Ces derniers ont mis en évidence la corrélation immédiate entre l'apparition d'endommagement « hors-plan », c'est-à-dire dans la direction orthogonale au plan chaîne-trame, à l'échelle mésoscopique (fissuration inter-torons) et macroscopique (rupture de torons par « kinking ») entraînant la rupture de l'éprouvette en sens chaîne ou trame. Cette deuxième campagne s'attachait donc premièrement à approfondir les observations à l'aide d'une instrumentation enrichie par de la microscopie in situ et par de la stéréo-corrélation d'images numériques afin de caractériser les déformations hors-plan apparaissant en compression. La cinétique d'endommagement au cours d'un essai de compression étant brutale, une caméra rapide a également été mise en place sur certains essais afin d'observer la propagation des fissures au cours de l'essai. Concernant la partie fatigue de cette seconde campagne, il a été essentiellement question de compléter les essais réalisés dans la première campagne pour deux rapports de charge spécifiques : 10 et -0,25. Enfin, des essais de performance résiduelle en compression après fatigue ont été réalisés dans le but de quantifier l'impact d'un endommagement généré en fatigue sur la réponse en compression monotone. Le **Tableau 2** récapitule une partie des essais réalisés lors de cette deuxième campagne expérimentale. La **Figure 2** représente les réponses typiques en contrainte-déformation obtenues en compression monotone pour les trois orientations testées.

Type d'essai	Instrumentations utilisées	Orientations testées	Nb essais
Compression statique	EA, SCIN, Caméra rapide	0°, 45°, 90°	6
Compression statique interrompue	Microscope Keyence	0°, 45°, 90°	8
Fatigue R=10 et R=-0.25	CIN 2D (sur 1 essai par config), extensomètre optique	0°, 90°	40
Performance résiduelle en compression après fatigue	Effort et déplacement machine	0°, 90°	2

Tableau 2: Récapitulatif de la 2ème campagne d'essais réalisée

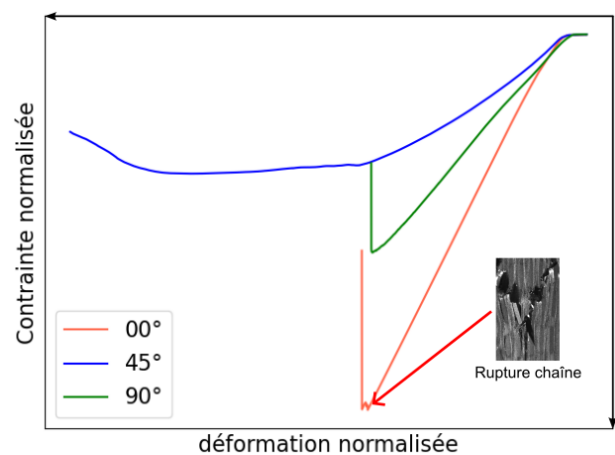


Figure 2: Courbes contrainte-déformation normalisées pour les 3 orientations testées

La Figure 3 illustre des évolutions de raideur obtenues lors d'essais de fatigue de compression pure ( $R=10$ ) et de fatigue en traction-compression ( $R=-0.25$ ) avec une forte proportion de traction. Cette figure illustre parfaitement le fait que la raideur macroscopique n'évolue que très peu au cours d'un essai de fatigue en compression pure avant la rupture (courbe de gauche), malgré l'apparition d'endommagements au cours de l'essai. Ces mêmes endommagements, apparaissant majoritairement dans l'épaisseur de l'éprouvette ont pu être observés à l'aide des systèmes de corrélation d'images numériques. Lors de passage, même faible en traction (courbe de droite de la Figure 3), une diminution progressive de la raideur est observée.

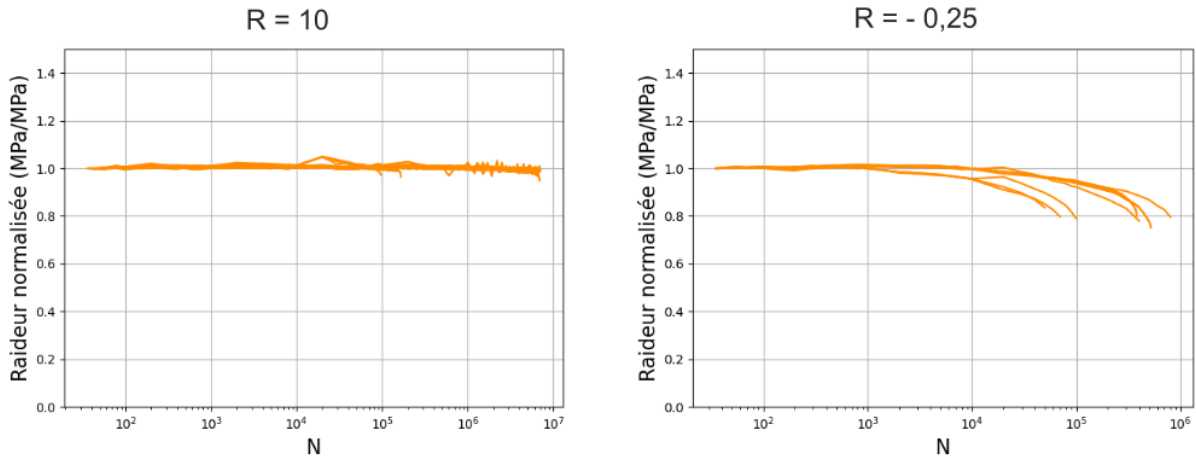


Figure 3: Evolution de la raideur normalisée au cours d'essais de fatigue pour des rapports de charge  $R=10$  et  $R=-0.25$  en sens chaîne ( $0^\circ$ )

La première campagne d'essais a permis de générer une base de données conséquente pour des rapports de charge encore peu étudiés. L'instrumentation mise en place sur certains essais a permis de mesurer l'évolution de la déformation hors-plan sur certains essais de compression pure et donc de faire un lien entre celle-ci et l'évolution de l'endommagement au cours de ces mêmes essais. La deuxième campagne, plus riche en instrumentations, a également mis en évidence l'impact des déformations hors-plan sur le comportement en compression dans le plan. Mais cette dernière a aussi permis d'améliorer la compréhension des mécanismes d'endommagement en quasi-statique et en fatigue ainsi que leur impact sur les performances résiduelles de nos matériaux. Suite à ces observations, nous proposons par la suite une modélisation du comportement en compression des composites tissés 3D basée sur un modèle phénoménologique co-développé entre l'ONERA et SAFRAN intitulé MOSCA (« Modèle Onera-Safran pour les Composites Avancés »).

### 3. Proposition d'une modélisation du comportement en compression

Le modèle MOSCA est basé sur le modèle ODM et utilise le cadre classique thermodynamique de la mécanique continue de l'endommagement avec des variables d'effets c'est-à-dire les variables d'endommagement  $d_i$  qui sont définies directement par les effets de l'endommagement sur les propriétés élastiques. Le modèle MOSCA s'appuie sur des lois incrémentales qui décrivent l'évolution progressive de l'endommagement lors de sollicitations statiques et de fatigue. La loi d'état dérivant du potentiel thermodynamique ([2]) est donnée par l'équation (Eq. 1) où les tenseurs de contrainte  $\sigma$  et de déformation  $\varepsilon$  sont reliés par la rigidité effective du matériau  $C^{eff}$ .

$$\sigma = C^{eff} : \varepsilon \text{ avec } C^{eff} = (S^{eff})^{-1} = (S^0 + \Delta S^{eff})^{-1} \quad (\text{Eq. 1})$$

La variation de la souplesse  $S^{eff}$  (inverse de la rigidité effective), traduit les effets de l'endommagement au sein du matériau à travers le tenseur d'effet  $\Delta S^{eff}$  défini par :

$$\Delta S^{eff} = \eta_1 d_1 H_1 + \eta_2 d_2 H_2 + \eta_3 d_3 H_3 \quad (\text{Eq. 2})$$

Où  $d_k$  sont les variables d'endommagement,  $\eta_k$  les index de désactivation (décrivant l'état actif ou passif du dommage) et  $H_k$  sont les tenseurs d'effets associés aux trois directions de dommage (sens chaîne et sens trame et hors-plan).

L'évolution de chaque variable  $d_k$  est pilotée par des forces motrices associées  $y_k$ , définies par :

$$y_k = \frac{1}{2} \left[ C_{kk}^0 (\varepsilon_k^{k+})^2 + a_{kl} C_{ll}^0 (\varepsilon_l^{k+})^2 + a_{km} C_{mm}^0 (\varepsilon_m^{k+})^2 \right] \quad (\text{Eq. 3})$$

où les termes  $\varepsilon_k^{k+}$  sont les déformations équivalentes positives dans la direction  $k$ , qui permettent de traduire l'absence d'endommagement pour des chargement de type compression (cf. [4] ou [5]).

La stratégie d'amélioration de MOSCA pour la prise en compte de la compression repose sur deux points : (i) modéliser l'amorçage et l'évolution du dommage hors-plan pour un chargement de compression dans le plan et (ii) traduire les effets de cet endommagement hors-plan sur la réponse dans le plan. Pour ce faire, le premier point se traduit par l'introduction d'un couplage plan/hors-plan dans l'expression des forces motrices pilotant l'évolution des endommagements. Et le second point se traduit par une définition des tenseurs d'effets du dommage hors-plan qui comportent des termes non-diagonaux modifiant donc les termes du tenseur des souplesses en direction 11 et 22. Le principe repose sur l'introduction d'un paramètre  $\theta$  traduisant l'orientation non-planes des fissures en hors-plan et permet, par des rotations de tenseurs, d'introduire ces termes non-diagonaux dans le tenseur d'effet du dommage hors-plan  $d_3$ .

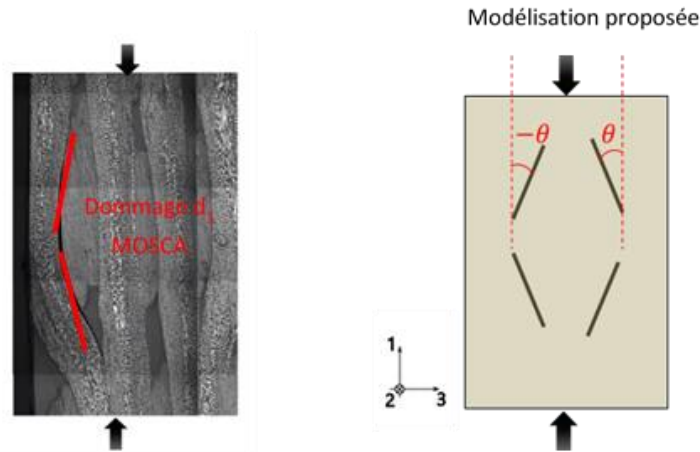


Figure 4: Mise en évidence expérimentale ([6]) et modélisation de l'inclinaison des fissures hors-plan apparaissant en compression

Une rotation de  $+\theta$  (ou  $-\theta$ ) des tenseurs d'effet locaux orientés dans le repère des fissures est effectuée afin d'exprimer la réponse macroscopique du matériau, cette rotation est illustrée en équation (Eq. 4).

$$H_3^{\pm\theta} = R_\varepsilon(\pm\theta) \cdot H_3^{local} \cdot R_\sigma(\pm\theta)^{-1} \quad \text{avec} \quad H_3^{local} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4})$$

En ce qui concerne les couplages des forces motrices, la stratégie mise en place dans la loi de comportement, pour l'instant, est équivalent aux couplages introduits dans la thèse de Lionel Marcin [2]. Pour cela, une nouvelle force motrice  $\bar{y}_k$  est introduite et résulte d'une expression dépendant

linéairement des forces motrices  $y_k$  exprimées en équation (Eq. 3). La forme généralisée de ce couplage est exprimée dans l'équation (Eq. 5).

$$\overline{y_d} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = A \cdot y_d = \begin{pmatrix} 1 & 0 & a_{13} \\ 0 & 1 & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} \text{ avec } a_{13} \neq a_{31} \text{ et } a_{23} \neq a_{32} \quad (\text{Eq.5})$$

Il s'agit d'un choix pragmatique préliminaire. La pertinence de ce choix est en cours d'évaluation et d'autres possibilités sont actuellement regardées comme d'exprimer les forces motrices dans le repère des fissures ( $+\theta$  et  $-\theta$ ).

#### 4. Conclusions

Le travail présenté comporte un volet expérimental et un volet modélisation. Le premier volet correspond à la caractérisation expérimentale en compression des composites tissés 3D à la fois en quasi-statique et en fatigue. Cet important travail expérimental est constitué de deux campagnes d'essais, la première riche en instrumentation a permis de mieux appréhender les mécanismes d'endommagement apparaissant lors de sollicitations de compression, la seconde comportant plus d'essais (une soixantaine au total) a pour but d'une part de générer les admissibles matériau mais aussi de fournir les informations pour l'identification du modèle. Ces campagnes d'essais ont mis en évidence l'influence du dommage hors-plan sur la réponse en compression dans le plan et donc la nécessité de prendre en compte le caractère multiaxial de la réponse du matériau pour cette sollicitation. La modélisation proposée repose le modèle MOSCA dans lequel l'influence multiaxiale du dommage hors-plan est traduite par l'introduction d'un nouveau paramètre traduisant l'inclinaison des fissures apparaissant lors de sollicitations de compression. Un couplage linéaire entre les forces motrices a également été introduit dans le but de piloter l'activation du dommage hors-plan par l'intermédiaire des forces motrices liées aux endommagements dans le plan.

#### Références

- [1] L. Marcin, « *Modélisation du comportement, de l'endommagement et de la rupture de matériaux composites à renforts tissés pour le dimensionnement robuste de structures* », Thèse Université Bordeaux 1, 2010.
- [2] L. Marcin, JF. Maire, N. Carrère, E. Martin, « *Development of a Macroscopic Damage Model for Woven Ceramic Matrix Composites* », International Journal of Fatigue **20**, 939–957, 2011.
- [3] C. Rakotoarisoa, « *Prévision de la durée de vie en fatigue des composites à matrice organique tissés interlock* », Thèse ONERA-Université Technologique de Compiègne, UTC, 2013.
- [4] L. Angrand, « *Modèle d'endommagement incrémental en temps pour la prévision de la durée de vie des composites tissés 3D en fatigue cyclique et en fatigue aléatoire* », Thèse de l'Université Paris-Saclay, 2016.
- [5] O. Sally, « *Stratégies de calcul pour la prévision de la durée de vie de structures composites soumises à des chargements complexes : Application aux composites oxyde/oxyde* », Thèse ONERA-Université Paris-Saclay, 2020.
- [6] A. Hurmane, « *Analyse par un dialogue essais/calculs de la tenue en compression de structures composites tissées interlocks* », Thèse ONERA- Université Technologique de Compiègne, 2015.
- [7] Norme ASTM D3039, « *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials* », 1971.
- [8] Norme ASTM D6641, « *Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials* », 2001.
- [9] S. Mousillat, F. Rasselet, M. Kaminski, F. Laurin, JF. Maire, « *Méthodologies et outils d'identification d'un modèle d'endommagement statique et de fatigue pour les composites tissés* », Journées Nationales sur les Composites 2023, Besançon.