

# Étude du comportement dynamique non linéaire en cisaillement des CMO : modélisation de la limite élastique et étude de l'évolution de l'endommagement

M. Castres<sup>a,b</sup>, J. Berthe<sup>a</sup>, M. Brieu<sup>b</sup>, E. Deletombe<sup>a</sup>

a. ONERA-The French Aerospace Lab, F59014 LILLE Cedex, FRANCE,  
email :magali.castres@onera.fr ; julien.berthe@onera.fr ; eric.deletombe@onera.fr

b. Centrale Lille, LML, F-59651 Villeneuve D'Ascq, FRANCE, email : mathias.brieu@centralelille.fr

## Résumé :

*Le comportement mécanique des composites à matrice organique (CMO) tels que le T700GC / M21 est généralement considéré par les industriels comme étant élastique orthotrope lorsque ces matériaux sont soumis à des chargements statiques. Au cours de la durée de vie d'un avion, les pièces qui le composent peuvent être soumises à des chargements extrêmes et à de fortes variations de température. Cependant, le comportement mécanique des CMO est connu pour présenter soit un comportement linéaire soit un comportement non linéaire. Dans la littérature, il existe différents modèles de comportement qui peuvent être dissociés en deux parties : un premier comportement linéaire, et un second comportement non linéaire précédant la ruine définitive du matériau. Le comportement linéaire ainsi que l'influence de la vitesse de déformation et de la température sur celui-ci a déjà été étudié lors de travaux réalisés par Berthe[2]. Une question importante pour la modélisation du comportement du matériau au delà de cette phase linéaire réside en l'évaluation et en la compréhension de la transition entre le comportement linéaire et le comportement non linéaire ainsi qu'en l'étude de l'influence de la vitesse de déformation et de la température sur celle-ci. Une fois cette transition clairement définie, la loi d'évolution du comportement non linéaire peut être étudiée ainsi que sa dépendance à la vitesse de déformation, afin de pouvoir par la suite simuler et prédire ce comportement. Les travaux présentés ici s'intéressent en particulier à cette étude.*

## Abstract :

*The mechanical behaviour of organic matrix composite materials such as T700GC/M21 CFRP is generally considered by industry as being orthotropic elastic for the sizing of aeronautical structures under normal isothermal-static-flight loads. During the aircraft life time, it may be exposed to severe loading conditions at various temperatures. However, the mechanical behaviour of CFRP is known to exhibit a linear behaviour or a non linear behaviour according to the types of loads which are considered e.g. creep or extreme conditions. In the literature, different models can be found which are based on different components : a first linear behaviour, a second non linear behaviour, and the failure of material. In previous work, Berthe [2] already studied the linear mechanical behaviour with the strain rate and*

*temperature dependencies of T700GC/M21. The next step is to evaluate the transition between linear and non linear behaviour. To characterize accurately this transition it is important to study the influence of strain rate and temperature on this transition. Once this transition is clearly defined, the evolution of the non linear behaviour can be studied with respect to strain rates and temperature dependencies, in order to model and predict this behaviour. This part is the subject of the presented works.*

**Mots clés : Composite à matrice organique, transition comportement linéaire et non linéaire, dépendance à la vitesse de déformation**

## 1 Introduction

De nos jours, les matériaux composites sont largement utilisés dans le domaine des transports, et en particulier dans le domaine de l'aéronautique. Ces matériaux permettent de réduire la masse de la structure, d'éviter la corrosion et de construire des pièces de formes complexes. Un des enjeux majeurs de l'aéronautique est de garantir la sécurité des passagers. Pour cela, il est important de comprendre le comportement mécanique des matériaux utilisés pour l'ensemble des conditions rencontrées au cours de la durée de vie de l'avion. Ces conditions comprennent une large gamme de vitesses de déformation,  $10^{-5}s^{-1} - 1000s^{-1}$ , allant du quasi-statique au dynamique, et de fortes variations de température de  $+50^{\circ}C$  à  $-50^{\circ}C$  en altitude. Le matériau d'étude de ces travaux est un composite à matrice organique (CMO), et plus particulièrement un composite UD carbone / époxy le T700GC/M21<sup>®</sup>. Ces matériaux sont connus pour avoir un comportement en cisaillement plan dépendant de la vitesse de déformation et de la température [1]. Le comportement mécanique de ces matériaux peut être dissocié en plusieurs parties : un premier comportement linéaire et un second comportement non linéaire suivi par la ruine finale du matériau. Le comportement linéaire en cisaillement du matériau étude, le T700GC/M21<sup>®</sup> a déjà été étudié [2, 3] ainsi que sa dépendance à la vitesse de sollicitation et à la température. Dans ces travaux [2, 3], un modèle spectral a été proposé pour décrire l'évolution du comportement linéaire sur l'ensemble de la gamme des sollicitations. La question qui suit est de savoir comment évaluer la transition entre le comportement linéaire et le comportement non linéaire du matériau, et comment modéliser l'évolution de cette transition avec la vitesse de déformation et la température. Dans la littérature, il n'existe pas de méthode clairement définie pour déterminer précisément cette transition. Les méthodes utilisées sont principalement des méthodes inverses. Lors de précédents travaux [4], une méthode d'évaluation de la transition entre le comportement linéaire et non linéaire permettant d'obtenir une valeur de contrainte et de déformation la caractérisant a été proposée. Cette méthode utilise uniquement les données expérimentales brutes et est applicable pour des vitesses de sollicitations allant de la quasi-statique à la dynamique, et ce pour une large gamme de températures. Par la suite, une modélisation de cette transition comportement linéaire / comportement non linéaire ainsi que sa dépendance à la vitesse de déformation et à la température a été proposée [5]. Ce modèle s'inspire de deux modèles de la littérature [6, 7]. Une fois cette transition clairement caractérisée, il devient possible de s'intéresser à la loi d'évolution du comportement non linéaire ainsi qu'à sa dépendance à la vitesse de déformation et à la température. C'est l'objet des travaux présentés ici.

## 2 Étude de l'évolution du comportement non linéaire

Dans la littérature, l'évolution du comportement non linéaire en quasi-statique est généralement étudiée à l'aide d'essais incrémentaux de charges / décharges [8]. Quelques études traitent de l'étude de l'évolution du comportement non linéaire en dynamique, notamment à l'aide d'essais interrompus [9]. Dans les travaux présentés ici, il est proposé d'étudier le comportement non linéaire de manière classique par des essais incrémentaux de charges/ décharges sur le T700/M21 <sup>®</sup>  $[\pm 45^\circ]_s$  jusqu'à la ruine du matériau.

### 2.1 Campagne d'essais charges / décharges

Le matériau étudié est un composite stratifié  $[\pm 45^\circ]$  quatre plis UD composés de résine M21 et de fibres de carbone de T700GC. Les essais sont réalisés à température ambiante. Les éprouvettes sont rectangulaires d'épaisseur 1.08mm, de largeur 15mm et de longueur 130mm [2]. Des talons de 50mm de longueurs sont collés sur chaque face et à chaque extrémité des éprouvettes. Sur chaque face opposée de l'éprouvette une jauge de déformation est collée, une pour mesurer la déformation dans le sens transversal et une pour mesurer la déformation dans le sens longitudinal. Les essais sont réalisés sur une machine servohydraulique INSTRON 8501 de capacité  $\pm 100kN$  avec une cellule d'effort de 25kN. Les signaux sont enregistrés en utilisant un système d'acquisition à 100Hz. Les essais sont pilotés en vitesse de déplacement de traverse. Des paliers incrémentaux en effort de 200N sont réalisés jusqu'à la ruine du matériau, ce qui représente un total de onze paliers. Ces essais sont réalisables pour des vitesses quasi-statiques cependant ils ne sont pas réalisables pour des vitesses dynamiques à cause des limitations de la machine et notamment de l'asservissement et du temps de réponse de la machine. Dans ces travaux, les essais sont réalisés pour trois vitesses de déplacement comprises entre 0.5mm/min et un maximum de 25mm/min, ce qui correspond à des vitesses de déformations comprises entre  $10^{-5}s^{-1}$  et  $10^{-3}s^{-1}$ . Au delà, la vitesse de consigne n'est plus respectée ainsi que l'hypothèse de vitesse constante durant l'essai. Pour chaque vitesse, trois essais de répétition sont réalisés.

### 2.2 Analyse des essais charges / décharges

Dans ces travaux, il est proposé de quantifier l'évolution du comportement non linéaire de façon usuelle [8] au travers d'un modèle d'endommagement décrivant l'évolution du module de cisaillement comme suit (1), et d'un deuxième critère correspondant à la déformation résiduelle mesurée à chaque fin de cycle.

$$D_{macro} = 1 - \frac{G_{12}}{G_{12}^0} \quad (1)$$

$G_{12}^0$  étant le module de cisaillement du premier cycle de chargement. Ce module est évalué en considérant la charge du premier cycle. Sur cette charge, une première régression linéaire est calculée en considérant les premiers points expérimentaux de la charge, puis des régressions linéaires successives sont calculées en intégrant à chaque régression un point expérimental de plus jusqu'à ce que tous les points de la charge du palier soient considérés. Pour chaque régression un coefficient de corrélation R est évalué. Le module correspond à la pente de la régression ayant le coefficient de corrélation maximal.  $G_{12}$  est le module de cisaillement du cycle traité, ce module est calculé sur la charge du palier traité à l'aide de la même méthode que celle suivie pour le premier palier. L'évolution du critère  $D_{macro}$  et du critère  $\varepsilon_{residual}$  en fonction de la contrainte maximum appliquée au palier est tracée sur la Figure 1. D'après les premiers résultats obtenus sur la Figure 1, l'évolution du module en fonction de la charge appliquée ainsi que la déformation résiduelle semblent dépendre de la vitesse de déformation.

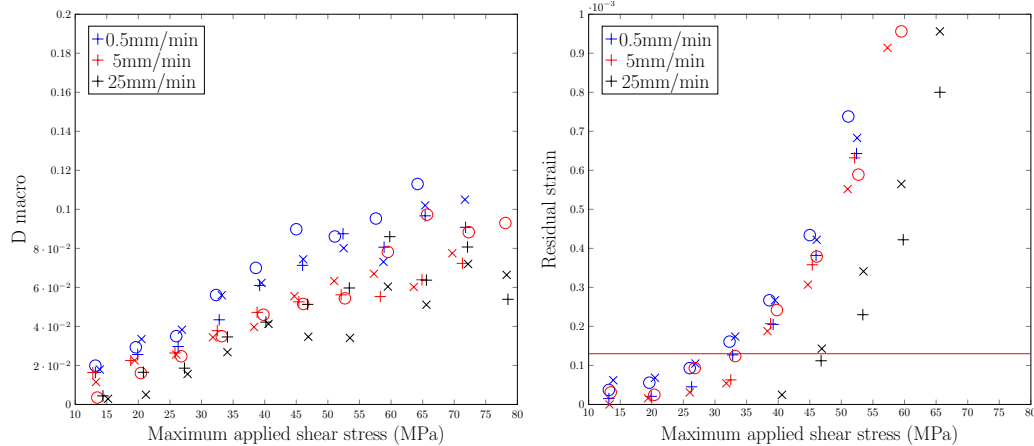


FIGURE 1 – Evolution de  $D_{macro}$  (gauche) et  $\varepsilon_{residuelle}$  (droite) en fonction de la contrainte maximale appliquée du palier à 20°C et pour 3 vitesses de déplacement.

### 3 Perspectives

A partir des informations obtenues lors de l'analyse des essais de charges / décharges il sera proposé d'étendre les modèles de comportements de la littérature [8, 10, 11] pour décrire l'évolution du comportement non linéaire observée sur la gamme de vitesses étudiée lors des essais charge / décharge, puis d'étendre ces modèles pour prendre en compte des vitesses de sollicitation allant du quasi-statique à la dynamique rapide [ $10^{-5}s^{-1} - 1000s^{-1}$ ] en s'appuyant sur l'ensemble des essais réalisés cyclés (Figure 2) et monotone quasi-statiques et dynamiques (Figure 3). Dans le but de pouvoir par la suite modéliser le comportement non linéaire sur l'ensemble des vitesses de sollicitations auxquelles peut-être soumis l'avion et de réaliser un calcul de structure représentatif des conditions réelles.

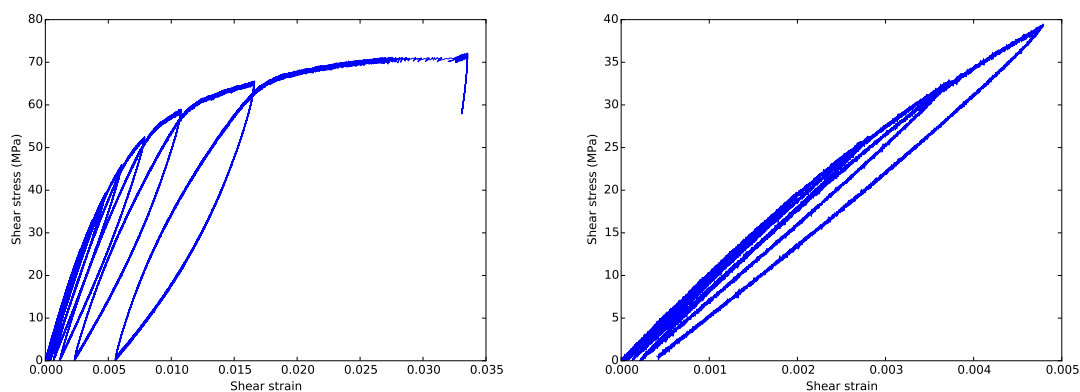


FIGURE 2 – Courbe contraintes / déformations en cisaillement pour un essai de charge / décharge du T700GC/M21 à 20°C et 0.5mm/min (à gauche), description de la finesse des paliers (à droite) .

### Références

- [1] A. Nettles, and E. Biss, Low temperature mechanical testing of carbon-fibre/epoxy-resin composite materials, Tech.Rep NASA/Marshall Space Flight Center/MSFC, Alabama, (1996).

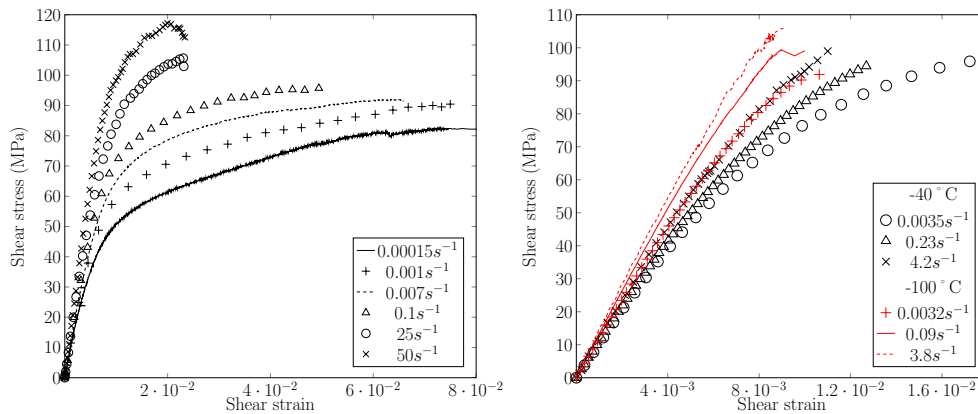


FIGURE 3 – Courbe contraintes / déformations pour un essai de traction monotone en cisaillement du T700GC/M21 pour différentes vitesses de déformation à 20°C à gauche et pour -40°C et -100°C à droite.

- [2] J. Berthe, Comportement thermo-visco-élastique des composites CMO-de la statique à la dynamique grande vitesse, Thèse de doctorat, ONERA/ Laboratoire Mécanique de Lille/ EDSPI072, 2013.
- [3] J. Berthe, M. Brieu, E. Deletombe, G. Portemont, Temperature effects on the time dependent viscoelastic behaviour of carbon / epoxy composite materials : Application to T700GC/M21, Materials and Design 62, 2014, 241-246.
- [4] M. Castres, J. Berthe, M. Brieu and E. Deletombe, Strain rate dependent elastic stress or strain treshold for carbon / epoxy materials behaviour, The 10th International Conference on the Mechanics of Time Dependent Materials Paris, 2016.
- [5] M. Castres, J. Berthe, E. Deletombe and M. brieu, Study and modelling of the non linear shear behaviour of CFRP under dynamic loadings, Compest Leuven, 2017.
- [6] R. Gerlach, C. Siviour, N. Petrinic and J. Wiegand, Experimental characterisation and constitutive modelling of RTM-6 resin under impact loading, Polymer 49, 2008,2728-2737.
- [7] J. Richeton, S. Ahzi, L. Daridon and Y. Rémond, Modelling of strain rates and temperature effects on the yield behaviour of amorphous polymer, J. Phys. IV 110, 2003,39-44.
- [8] P. Ladevèze and E. Ledantec, Damage modelling of the elementary ply for laminated composites, Composites Science and Technology 43, 1992, 257-267.
- [9] G. Hug, Analyse du comportement de stratifiés carbone / époxy sous sollicitation rapide. Élaboration par électrothermie diélectrique d'un même matériau pour comparaison, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure es Arts et Métiers, ED-432, 2005.
- [10] D. Lévêque, Analyse de la tenue au délaminage des composites stratifiés : identification d'un modèle d'interface interlaminaire, Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Caen/CNRS/Université Paris YI, Laboratoire de Mécanique et de Technologie, 1998.
- [11] F. Laurin, Approche multiéchelle des mécanismes de ruine progressive des matériaux stratifiés et analyse de la tenue des structures composites, Thèse de doctorat, ONERA/ Université de Franche-comté, 2005.