



**HAL**  
open science

## Évaluation et modélisation de la limite élastique des composites renforcés fibres de carbone

Magali Castres, Julien Berthe, Eric Deletombe, Mathias Brieu

### ► To cite this version:

Magali Castres, Julien Berthe, Eric Deletombe, Mathias Brieu. Évaluation et modélisation de la limite élastique des composites renforcés fibres de carbone. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. ⟨hal-01621559⟩

**HAL Id: hal-01621559**

**<https://hal.science/hal-01621559v1>**

Submitted on 23 Oct 2017

**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.



HAL Authorization

# Évaluation et modélisation de la limite élastique des composites renforcés fibres de carbone

## *Evaluation and modelling of the elastic limit of CFRP*

Magali Castres<sup>1,2</sup>, Julien Berthe<sup>1</sup>, Eric Deletombe<sup>1</sup> et Mathias Brieu<sup>2</sup>

1 : ONERA-The French Aerospace Lab  
5 Boulevard Paul Painlevé, F-59045, Lille Cedex, France  
e-mail : magali.castres@onera.fr, julien.berthe@onera.fr et eric.deletombe@onera.fr

2 : Centrale Lille, LML  
Cité Scientifique, F-59651, Villeneuve D Ascq  
e-mail : 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 dimensionnés pour les des chargements statiques. Cependant, 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. Or, la réponse mécanique des CMO peut présenter des comportements plus complexes selon les sollicitations appliquées et les stratifications utilisées. Dans la littérature, il existe donc différents modèles de comportement qui peuvent être dissociés en deux phases : une première phase linéaire, et une seconde 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[1]. Une question importante pour la modélisation du comportement du matériau au delà de la phase linéaire concerne l'évaluation et la compréhension de la transition entre la réponse linéaire et la réponse non linéaire du matériau, ainsi qu'en l'étude de l'influence de la vitesse de déformation et de la température sur celle-ci. Les travaux présentés ici s'intéressent à cette question.

### 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. But during the aircraft life time, it may be exposed to severe loading conditions at various temperatures. However, the mechanical behaviour of CFRP can then exhibit a linear behaviour or a non linear behaviour according to the type of load which is considered e.g. creep or extreme conditions. In the literature, different models can be found to represent different phases of behaviour : a first linear one possibly followed by a second non linear one, before the failure of the material. In previous works, Berthe [1] 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 the linear and non linear behaviour. To characterize accurately this transition it is also important to study the influence of strain rate and temperature on it. These works have been presented in [2]. Once the method to evaluate the transition is clearly defined, a model to describe its evolution with the temperature and the strain rate can be proposed. This is the aim of the works presented here.

**Mots Clés :** Composites à matrice organique, dépendance à la vitesse de déformation, dépendance à la température, comportement non linéaire.

**Keywords :** Organic matrix composite, strain rate dependency, temperature dependency, non linear behaviour.

## 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,  $10^{-4} s^{-1} - 1000 s^{-1}$ , 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 [ $\pm 45^{\circ}$ ]. Ces matériaux sont connus pour avoir un comportement en cisaillement plan dépendant de la vitesse de déformation et de la température [3]. Ce comportement peut être dissocié en plusieurs phases : une première phase linéaire et une seconde non linéaire, suivie par la ruine finale du matériau. Le comportement linéaire en cisaillement du T700GC/M21 a déjà été étudié [1, 4] ainsi que sa dépendance à la vitesse de sollicitation et à la température. Dans ces travaux, un modèle spectral a été proposé pour décrire l'évolution du comportement 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 [2], une méthode d'évaluation de la transition entre le comportement linéaire et non linéaire permettant d'obtenir une valeur de contrainte ou 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. Dans les travaux présentés dans cet article, une modélisation de l'évolution de la transition entre le comportement linéaire et le comportement non linéaire avec la vitesse de déformation et la température est proposée.

## 2. Modélisation de l'évolution de la transition comportement linéaire / comportement non linéaire avec la vitesse de déformation

Lors de travaux précédents [2], la contrainte et la déformation de transition entre le comportement linéaire et non linéaire a été évaluée pour le T700GC/M21 pour différentes températures et pour différentes vitesses de sollicitations. Il a été observé que cette transition était fortement dépendante de la vitesse de sollicitation et de la température (Fig. 1). Dans un premier temps, l'influence de la vitesse

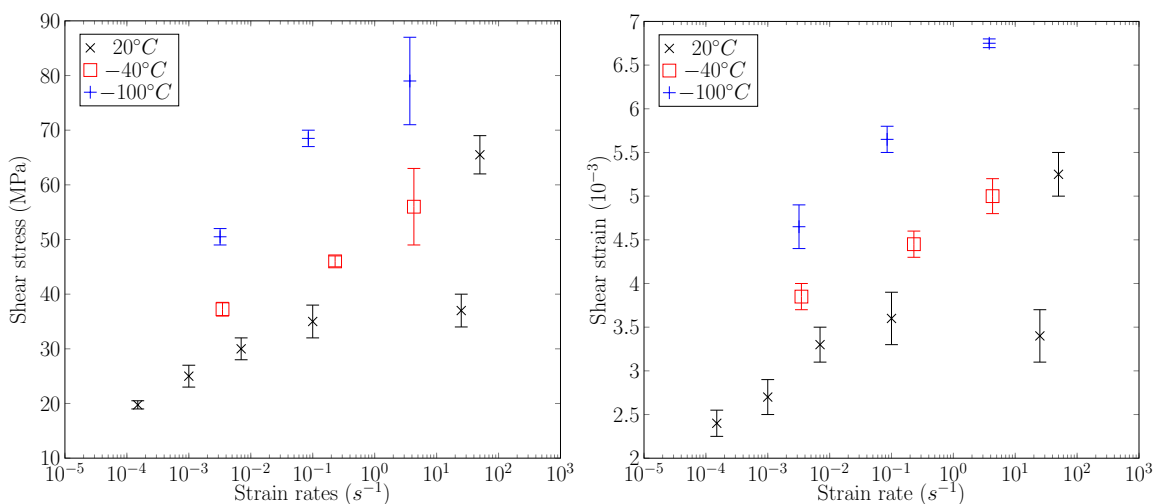


Fig. 1. Evolution de la contrainte (gauche) et de la déformation (droite) de transition entre les comportements linéaire / non linéaire avec la vitesse de déformation pour différentes températures

de déformation sur cette transition est étudiée et modélisée. Dans la littérature des composites, il existe quelques travaux visant à décrire l'influence de la vitesse de déformation sur leur critère de rupture

[5, 6, 7, 8]. Ces critères sont basés sur des expressions mathématiques de types logarithmiques ou polynomiaux, et semblent insuffisants pour décrire l'évolution de la transition comportement linéaire / non linéaire sur la large gamme de vitesses considérée. En effet, dans les travaux cités [5, 6, 7, 8] les critères ne sont évalués qu'en considérant trois vitesses de déformations, par conséquent une expression de type logarithmique ou polynomiale semble suffisante. Cependant, dans les travaux présentés ici, la contrainte ou déformation de transition est évaluée pour six vitesses de déformation allant de  $10^{-7}s^{-1}$  à  $1000s^{-1}$ . Sur cette gamme de vitesses de déformation, différents mécanismes semblent être mis en jeu, donc le modèle choisi doit permettre de rendre compte de l'ensemble de ces mécanismes. De plus, dans un modèle polynomial la contrainte / déformation obtenue serait infinie lorsque la vitesse tendrait vers l'infini, ce qui ne semble pas physique. Par conséquent, la littérature des polymères et notamment des résines époxy a également été étudiée.

Ainsi, dans les travaux réalisés par Gerlach et al. [9], il est proposé d'utiliser le modèle de Goldberg [10] pour modéliser la dépendance à la vitesse de sollicitation de la déformation à rupture de la résine époxy RTM6. Le modèle peut se résumer comme suit (Eq. 1) :

$$\varepsilon_{fail} = \varepsilon_{ini} + \varepsilon_{diff} * (1 - \exp(c_2 * \dot{\varepsilon}^{c_3})) \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec :

$\varepsilon_{ini}$  = Déformation à rupture initiale

$\varepsilon_{diff}$  = Différence entre la déformation à rupture en quasi-statique et en dynamique

$C_2, C_3$  = Constantes matériaux

Ce modèle est appliqué sur les résultats expérimentaux obtenus sur le T700GC/M21 (Fig. 1), en considérant non plus la déformation à rupture mais en considérant la déformation / contrainte de transition. Les résultats obtenus sont présentés (Fig 2).

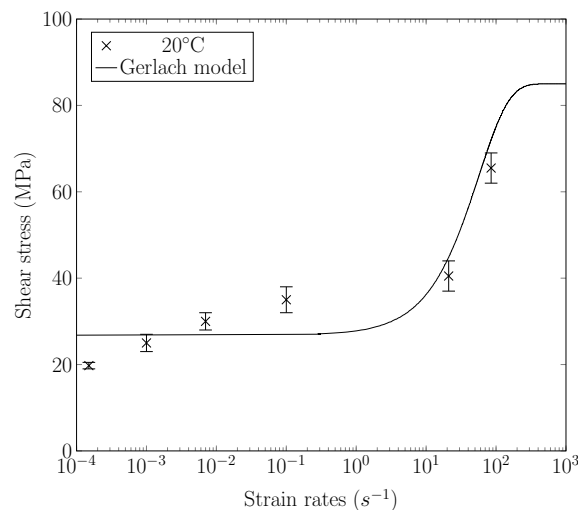


Fig. 2. Comparaison entre les résultats expérimentaux de la contrainte de transition entre les comportements linéaire / non linéaire du T700GC/M21 à 20° pour différentes vitesses de déformation et le modèle de Goldberg modifié

Le modèle proposé par Gerlach semble insuffisant pour décrire précisément l'évolution de la transition entre les comportements linéaire / non linéaire sur la gamme de vitesse étudiée. Le modèle proposé par Gerlach décrivait l'évolution de la déformation à rupture pour des vitesses de déformation entre  $5.10^{-2}s^{-1}$  et  $1000s^{-1}$ , donc pour une gamme de vitesse réduite. Dans les travaux présentés, il est donc proposé de superposer deux modèles de Gerlach pour décrire les différents mécanismes mis en jeu du quasi-statique à la dynamique. Cette adaptation s'inspire du modèle bi-spectral proposé par Berthe et al. [1] pour décrire l'évolution du comportement élastique du T700GC/M21 sur cette même gamme de vitesses de déformation, un des spectres permet de décrire l'évolution en quasi-statique et

l'autre de décrire l'évolution en dynamique. De manière similaire, le modèle proposé pour décrire l'évolution de la transition contient deux sigmoïdes : une pour décrire les mécanismes intervenants en quasi-statique et l'autre pour décrire les mécanismes en dynamique. Le modèle ainsi proposé est appliqué aux résultats précédemment obtenus (Fig 3).

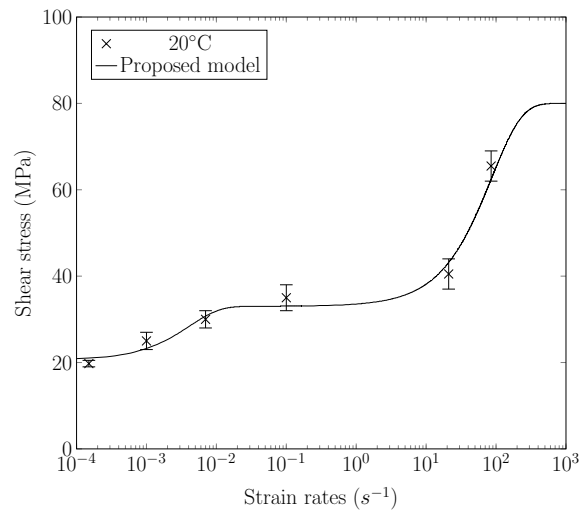


Fig. 3. Comparaison entre les résultats expérimentaux de la contrainte de transition entre le comportement linéaire / comportement non linéaire du T700GC/M21 à 20°C pour différentes vitesses de déformation et le modèle proposé

Le modèle proposé semble mieux décrire l'évolution de la contrainte de transition, et par conséquent les mécanismes mis en jeu, sur l'ensemble de la gamme de vitesses étudiée.

Cependant, la transition entre le comportement linéaire et le comportement non linéaire est également fortement dépendante de la température. Or dans le modèle proposé cette dépendance n'est pas prise en compte : il doit donc être modifié en conséquence.

### 3. Modélisation de l'évolution de la transition avec la température

La littérature des composites traitant de l'influence de la température sur les critères de rupture ou sur l'évolution du module est limitée. La prise en compte de l'influence de la température sur les critères de rupture des composites se matérialise par l'intermédiaire de contraintes résiduelles de cuisson. Cette méthode permettrait d'obtenir la contrainte de transition pour différentes températures par translation de la contrainte obtenue à température ambiante. Compte tenu de l'évolution observée, une simple translation de la contrainte ne semble pas suffisante pour décrire l'évolution de la transition comportement linéaire / non linéaire avec la température. Par conséquent la littérature des polymères est également analysée, avec plus particulièrement les travaux de Richeton et al. [11, 12]. Dans ses travaux Richeton propose de modéliser l'influence de la température sur la limite élastique des polymères comme suit (Eq. 2) :

$$\sigma_{yield} = \sigma_i(0) - m * T + \frac{2 * k * T}{V} \sinh^{-1} \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0 * \exp \left( -\frac{\Delta H_\beta}{k * T} \right)} \right) \quad (\text{Eq. 2})$$

Avec :

- $\sigma_i(0)$  = Contrainte interne à 0K
- $m$  = Constante matériau
- $k$  = Constante de Boltzmann
- $V$  = Volume d'activation arbitraire
- $\Delta H_\beta$  = Énergie d'activation  $\beta$

Ce modèle comporte des paramètres tels que les énergies d'activation qui sont actuellement difficilement mesurables en dynamique. L'idée proposée dans nos travaux est de s'inspirer de la philosophie du modèle proposé par Richeton et al. [11, 12] pour inclure une dépendance à la température dans le modèle précédemment proposé prenant déjà en compte l'influence de la vitesse de déformation. Le but est ici d'obtenir un modèle décrivant l'évolution de la transition comportement linéaire / comportement non linéaire avec la vitesse de déformation et la température. L'équation du modèle est la suivante : (Eq. 3).

$$\sigma_t = a - \frac{2 * T}{b} * \exp\left(-\left(\frac{c}{T}\right)^d * \dot{\epsilon}\right) - \frac{2 * T}{e} * \exp\left(-\left(\frac{f}{T}\right)^d * \dot{\epsilon}\right) \quad (\text{Eq. 3})$$

Avec :

- $\sigma_t$  = Contrainte de transition
- $a$  = Contrainte de transition à saturation
- $b, c, d, e, f$  = Constantes
- $T$  = Température en Kelvin

Le modèle ainsi modifié est appliqué aux résultats expérimentaux (Fig. 4). Les constantes sont obtenues par optimisation des moindres carrés.

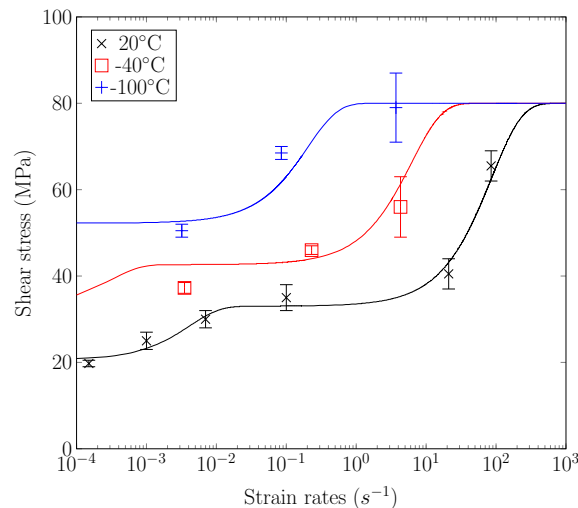


Fig. 4. Comparaison entre les résultats expérimentaux de la contrainte de transition comportement linéaire / comportement non linéaire du T700GC/M21 à 20°, -40°C et -100°C pour différentes vitesses de déformation et le modèle proposé

Le modèle proposé permet finalement de décrire de façon satisfaisante l'évolution de la contrainte de transition sur la gamme de vitesses de déformation et de températures étudiée.

Le même travail pourrait être réalisé pour décrire cette fois l'évolution de la déformation de transition avec la vitesse de déformation et la température.

#### 4. Conclusions et perspectives

Dans les travaux présentés, des modèles issus de la littérature ont été considérés pour décrire l'évolution de la contrainte de transition entre le comportement linéaire et non linéaire. Des propositions d'amélioration de ces modèles ont été effectuées pour permettre de décrire l'évolution de la transition sur la large gamme de vitesses de sollicitation et de températures étudiée. Une fois cette transition clairement définie, il est proposé d'étudier dans la suite des travaux, le comportement non linéaire endommageable du matériau ainsi que l'influence de la vitesse de sollicitation et de la température sur ce comportement. Pour cela une étude classique, comportant des essais de charge / décharge est en cours de réalisation.

## Références

- [1] J. Berthe, M. Brieu, E. Deletombe « Thermo-viscoelastic modelling of organic matrix composite behaviour - Application to T700GC/M21 », *Mechanics of Materials* Vol. 81, pp. 18 – 24, 2015, ISSN 0167-6636.
- [2] M. Castres, J. Berthe, M. Brieu, E. Deletombe « Strain rate dependent elastic stress or strain threshold for carbon / epoxy materials behaviour », *The 10th International Conference on the Mechanics of Time Dependent Materials, Paris* Vol. , pp. , 2016.
- [3] A. Nettles, E. Biss « Low temperature mechanical testing of carbon-fiber/epoxy-resin composite materials », Tech. Rep., NASA/Marshall Space Flight Center Center/MSFC,Alabama, 1996.
- [4] 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* Vol. 62, pp. 241–246, 2014, ISSN 0261-3069.
- [5] I. M. Daniel, J.-J. Luo, P. M. Schubel, B. T. Werner « Interfiber/interlaminar failure of composites under multi-axial states of stress », *Composites Science and Technology* Vol. 69 n° 6, pp. 764 –771, 2009, ISSN 0266-3538.
- [6] I. Daniel, B. Werner, J. Fenner « Strain-rate-dependent failure criteria for composites », *Composites Science and Technology* Vol. 71 n° 3, pp. 357–364, 2011, ISSN 0266-3538.
- [7] L. Raimondo, L. Iannucci, P. Robinson, P. Curtis « Modelling of strain rate effects on matrix dominated elastic and failure properties of unidirectional fibre-reinforced polymer-matrix composites », *Composites Science and Technology* Vol. 72 n° 7, pp. 819–827, 2012, ISSN 0266-3538.
- [8] Y. Tao, H. Chen, K. Yao, H. Lei, Y. Pei, D. Fang « Experimental and theoretical studies on inter-fiber failure of unidirectional polymer-matrix composites under different strain rates », *International Journal of Solids and Structures* Vol. 113-114, pp. 37–46, 2017, ISSN 0020-7683.
- [9] R. Gerlach, C. Siviour, N. Petrinic, J. Wiegand « Experimental characterisation and constitutive modelling of RTM-6 resin under impact loading », *Polymer* Vol. 49, pp. 2728–2737, 2008.
- [10] R. K. Goldberg, D. C. Stouffer « Strain Rate Dependent Analysis of a Polymer Matrix Composite Utilizing a Micromechanics Approach », *Journal of Composite Materials* Vol. 36 n° 7, pp. 773–793, 2002.
- [11] J. Richeton, S. Ahzi, L. Daridon, Y. Rémond « A formulation of the cooperative model for the yield stress of amorphous polymers for a wide range of strain rates and temperatures », *Polymer* Vol. 46 n° 16, pp. 6035–6043, 2005, ISSN 0032-3861.
- [12] J. Richeton, S. Ahzi, K. Vecchio, F. Jiang, R. Adharapurapu « Influence of temperature and strain rate on the mechanical behavior of three amorphous polymers : Characterization and modeling of the compressive yield stress », *International Journal of Solids and Structures* Vol. 43 n° 7-8, pp. 2318–2335, 2006, ISSN 0020-7683.