

Lien fatigue/fluage dans les composites thermoplastiques : vers une approche innovante de prédiction de durée de vie

François Lamming^{1,2}, Nacera Bedrici², Stéphane Gillet² et Sébastien Joannès¹

1 : Centre des matériaux (MAT), UMR7633 CNRS
Mines Paris, Université PSL

63-65 Rue Henri Auguste Desbruères, B.P. 87 91003 Evry Cedex
e-mail : francois.lamming@minesparis.psl.eu et sebastien.joannes@minesparis.psl.eu

2 : Pôle MSCE, EstacaLab
ESTACA

ESTACA Campus Ouest - Parc Universitaire Laval-Changé - Rue Georges Charpak BP 76121, 53061 Laval Cedex 9
e-mail : francois.lamming@estaca.fr, nacera.bedrici@estaca.fr et stephane.gillet@estaca.fr

Résumé

Ces travaux visent à mettre en place un modèle de fatigue pouvant capturer un critère en vitesse de déformation en fluage cyclique sur un composite SFRT (résine thermoplastique et fibres de verre courtes). Lors de travaux antérieurs, ce critère a mis en évidence un lien entre le fluage et la fatigue. Associé à une méthodologie de post-traitement d'une base de données expérimentale, il ouvre la voie au développement d'un modèle de fatigue simplifié utilisable dans le monde industriel.

Abstract

This work focuses on developing a fatigue model designed to capture a strain rate criterion under cyclic creep conditions in a short-fiber-reinforced thermoplastic (SFRT) composite. In previous studies, this criterion demonstrated a link between creep and fatigue. Together with a post-processing methodology for an experimental database, it establishes the foundation for creating a simplified fatigue model suitable for industrial applications.

Mots Clés : fatigue, fluage, SFRT, modèle de comportement, rapport de charge

Keywords : fatigue, creep, SFRT, model, load ratio

1. Introduction

1.1. Généralités

Pour répondre aux défis complexes posés par le réchauffement climatique, il est essentiel d'améliorer l'efficacité énergétique des véhicules. Une des pistes est d'exploiter davantage les matériaux composites à matrice organique, en particulier ceux à base de **thermoplastiques**. Ces matériaux, facilement injectables, permettent de réduire significativement le poids des structures tout en offrant une bonne recyclabilité et des cadences de production élevées. Initialement destinés à des composants faiblement sollicités, les composites thermoplastiques, tels que le **PA66GF50**, répondent désormais aux exigences des pièces soumises à des contraintes sévères et des environnements hostiles. Afin de garantir la sécurité des utilisateurs il est essentiel de prédire efficacement **la durée de vie** des composants dans des conditions réelles de fonctionnement.

La caractérisation de la **fatigue** mécanique est exercice complexe : ce matériau est particulièrement sensible aux paramètres **externes** (ou extrinsèques) tels que la température, l'humidité ambiante (%RH) et le rapport de charge cyclique (R) [4], ainsi qu'à certains paramètres **intrinsèques** liés aux variabilités morphologiques de la microstructure (orientation des renforts, effet cœur/peau, etc.). De nombreux

critères ont été proposés dans la littérature pour prédire la durée de vie des pièces soumises à la fatigue [7]. Ces critères établissent une relation empirique entre la durée de vie supposée (nombre de cycles ou temps avant ruine) et une ou plusieurs grandeurs observables ou déductibles (vitesse de déformation, contrainte, énergie, etc.) à l'échelle locale du matériau.

Parmi ces critères, une approche particulièrement robuste nommé $2CMaxE$, basé sur la vitesse de déformation en fluage cyclique, a été développée pour prédire la durée de vie d'éprouvettes pour une large gamme de paramètres extrasèques et intrinsèques [3]. Par ailleurs, des modèles de comportement phénoménologiques simples, associé à des critères en énergie, ont ouvert la voie à des prédictions numériques de durée de vie [2]. Ce type d'approche a pour avantage de quantifier la durée de vie locale d'une pièce sans recourir à un modèle d'endommagement incrémental complexe et chronophage. Partant de ce constat, il est judicieux de mettre en place un **modèle de comportement phénoménologique** compatible avec le critère $2CMaxE$ afin d'estimer la durée de vie de structures avec précision et rapidité.

Dans cet article, les enjeux liés à la caractérisation en fatigue et les principaux critères disponibles sont exposés, avant de détailler la méthodologie d'essai mise en œuvre. Une approche de post-traitement des données est développée, permettant de sélectionner un modèle de comportement efficace pour prédire avec un maximum de précision la durée de vie d'une pièce.

1.2. Critère de fatigue

Dans les travaux de [3], un critère basé sur la **vitesse cyclique maximale de déformation** (V_{max}) a montré d'excellentes performances pour des rapports de charge allant de -1 à 1 . Ce critère s'avère légèrement plus efficace que les critères basés sur l'énergie, tels que l'AED [1], ou que les critères mixtes (déformation-énergie) [6]; d'autant qu'il est applicable en fluage. De plus, il repose uniquement sur la réponse du matériau (déformation) dans le cas d'un chargement à force imposée. Par ailleurs, il met en valeur une **équivalence** temps à rupture (t_f) et vitesse maximale de déformation en fluage cyclique (V_{max}) (Eq. 1). Cette vitesse est calculée comme la moyenne de la vitesse de déformation maximale cyclique sur la phase stabilisée.

$$V_{max} \Leftrightarrow \frac{1}{t_f} \quad (\text{Eq. 1})$$

Ainsi, indépendamment de tout paramètre extrinsèque ou intrinsèque, à une unique vitesse de déformation cyclique maximale correspond une unique durée de vie. Comparé à des critères plus complexes [6], ce critère nécessite seulement **deux paramètres et une seule grandeur physique** pour sa mise en œuvre, offrant ainsi une approche plus **simple et directe**.

2. Méthode

2.1. Matériau et conditionnement

Le PA66GF50 est un composite à matrice **polyamide 6.6** renforcé de **fibres de verre courtes**, à hauteur de 50 % en masse. Il est fourni sous forme de plaques moulées par injection, d'une épaisseur de 3 mm.

Pour cette étude, deux conditionnements en humidité relative sont choisis : 0 % et 50 %. Des éprouvettes plates à section variable (type *ISO527*) sont découpées dans les plaques moulées par injection avec deux angles différents (θ) par rapport à la direction d'injection : 0° et 90° .

2.2. Essais mécaniques

Les essais de fatigue et de fluage ont été réalisés au moyen d'une machine hydraulique de traction/compression uniaxiale *INSTRON 8801*. Tous les essais ont été menés à la température ambiante ($T = 23\text{ °C}$). Des mesures de masse ont indiqué une variation d'humidité négligeable pendant les essais. Les essais sont pilotés en effort, les chargements en fatigue étant effectués à l'aide d'un signal sinusoïdal de fréquence constante (1 Hz) pour limiter tout éventuel auto-échauffement.

3. Résultats

3.1. Observations macroscopiques

Afin de comprendre l'effet du chargement sur la durée de vie du PA66GF50, des essais de fatigue ont été effectués pour plusieurs contraintes maximales σ_{max} et rapports de charge R ($R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$). Les durées de vie sont ensuite tracées sur des courbes de Wöhler, exprimées en durée de vie t_f et non en nombre de cycles N_f . Pour chaque rapport de charge, une couleur est attribuée, du vert pour $R = 0$ au rouge foncé pour les rapports de charge proches de 1.

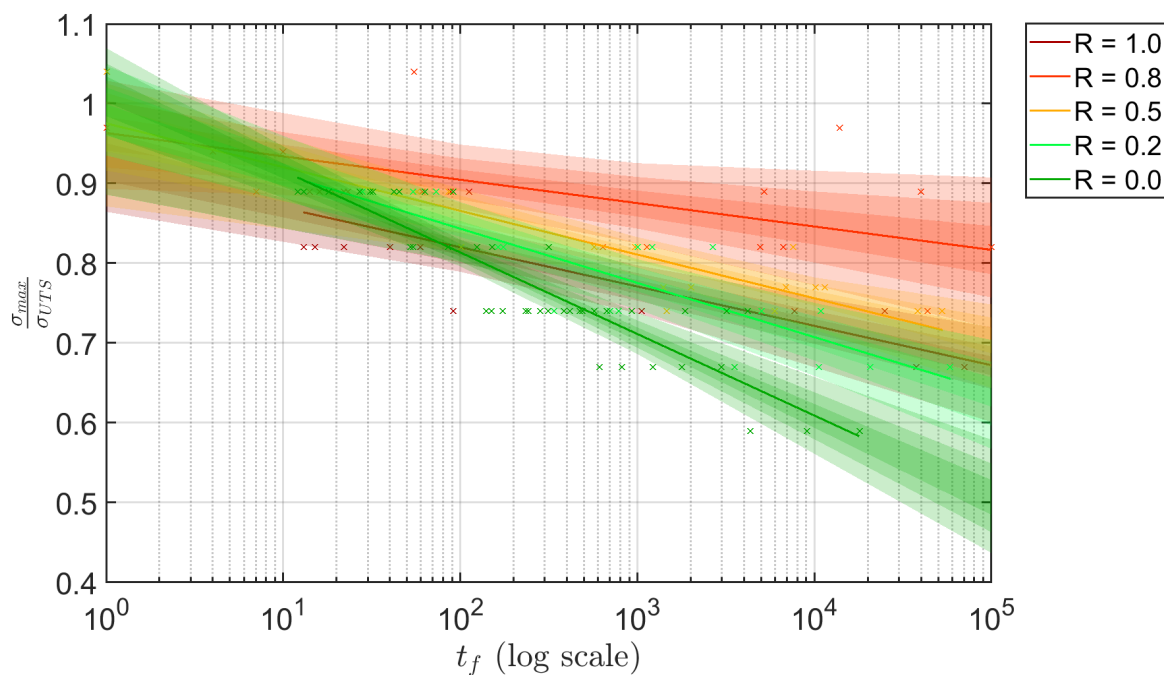


Fig. 1. – Régression linéaire Bootstrap pour différents rapports de charge, 90°, 50 RH

L'effet du rapport de charge sur la courbe de Wöhler est présenté (Fig. 1). Ces courbes sont ici décrites par l'évolution du rapport $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{UTS}}$ en fonction de la durée de vie à rupture t_f . La forte dispersion observée introduit une **incertitude** dans l'analyse des résultats, en particulier lorsque R augmente. Une méthode statistique dite « Bootstrap » est alors appliquée afin de tenter de séparer les **effets statistiques** des **phénomènes physiques**. Différentes **bandes probabilistes** sont superposées pour chaque rapport de charge. La bande la plus large (et la plus claire) correspond à l'espace occupé par 99 % des régressions linéaires tracées avec les données disponibles. La bande intermédiaire correspond à 95 % des régressions linéaires et la bande la plus fine à 68 %.

Au regard du tracé Bootstrap, une tendance claire ressort : une augmentation du rapport de charge entraîne une diminution de la pente de la courbe $S - t$. Concernant la position des courbes, une remontée est observée de $R = 0$ jusqu'à $R = 0.5$ ou $R = 0.8$ (selon le taux d'humidité ou l'orientation choisie), puis la position baisse. Finalement, ces tendances donnent lieu à un croisement entre les courbes des

différents rapports de charge, plus ou moins précoce selon les conditions extrinsèques mais la grande variabilité des résultats ne permet pas de relever une corrélation directe. Ce comportement semble diverger de ceux rapportés dans la littérature [5, 6]. Bien qu’une évolution parallèle des courbes $S - t$ soit fréquemment observée, le nombre limité d’essais et l’absence d’analyse statistique approfondie rendent difficile l’identification d’une différence nette de comportement.

3.2. Modélisation

La modélisation du comportement en fatigue des composites thermoplastiques renforcés, comme le PA66GF50, vise à prédire leur durée de vie sous différentes sollicitations, en se concentrant ici sur l’influence du chargement, caractérisé par σ_{max} et R .

L’objectif est de déterminer une **loi de comportement** matériau capable de capter la vitesse maximale de fluage cyclique V_{max} , un paramètre clef pour le calcul de durée de vie par le critère $2CMaxE$.

3.2.1. Hypothèses et méthodologie

L’analyse est restreinte à un **cas unidimensionnel simple**, permettant une exploration rapide et efficace des lois existantes. Celle-ci doit être **simple** (phénoménologique), tout étant applicable pour $R \in [-1, 1]$. Partant du lien entre fatigue et fluage, l’idée originale est d’explorer et d’utiliser des lois de fluage disponibles dans la littérature pour prédire V_{max} sous chargements cycliques. Deux cycles de chargement complets sont alors simulés pour chaque combinaison de σ_{max} et R . Un post-traitement permet d’extraire V_{max} , vitesse de déformation maximale entre les deux maximums cycliques.

Les simulations numériques ont été réalisées sous Matlab, en résolvant l’équation différentielle de la loi de comportement d’étude. Les paramètres de cette loi sont ajustés par un algorithme d’optimisation, minimisant l’erreur relative quadratique entre les valeurs expérimentales et simulées de V_{max} .

3.2.2. Choix d’une loi de comportement

Les lois de comportement linéaires en contrainte sont rapidement écartées car elles ne permettent pas de reproduire la tendance fortement non linéaire de V_{max} lorsque σ_{max} augmente (Fig. 2). Des essais plus concluants sont alors effectués avec des **lois non linéaires** comme la loi de **Norton** (Eq. 2) (loi visco-plastique), où σ est la contrainte appliquée, n est l’exposant de fluage, et η est le coefficient de viscosité.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma^n}{\eta} \quad (\text{Eq. 2})$$

L’équivalence soulignée (Eq. 1) permet d’associer à chaque t_f un V_{max} . Il est alors possible de transformer les courbes $S = f(t_f)$ en courbes $V_{max} = f(\sigma_{max})$. À chaque niveau de contrainte donné, on associe V_{max} , calculée selon le critère $2CMaxE$ à partir de t_f extrait de la courbe $S - t_f$ correspondante. Une incertitude étendue, avec un niveau de confiance de 95 %, est également calculée à partir des données expérimentales de la contrainte associée (Fig. 2). La figure est tracée pour un rapport de charge fixé ($R = 0.2$). Lorsque la borne inférieure est trop faible pour être affichée, seul la borne supérieure apparaît. Certains points sont uniques et ne possèdent alors pas d’incertitude. On superpose aux données expérimentales les données calculées avec une loi de comportement de type Norton. Pour cette courbe, un jeu de paramètre (η, n) est utilisé.

Ainsi, il apparaît qu’une loi de Norton, pourtant très simple, est capable de suivre efficacement l’évolution de V_{max} avec σ_{max} , à R fixé. Cependant, la plupart des lois de fluage simples, comme celle de **Norton**, présentent des limites lorsque l’on fait varier R . L’identification n’est en effet valable que

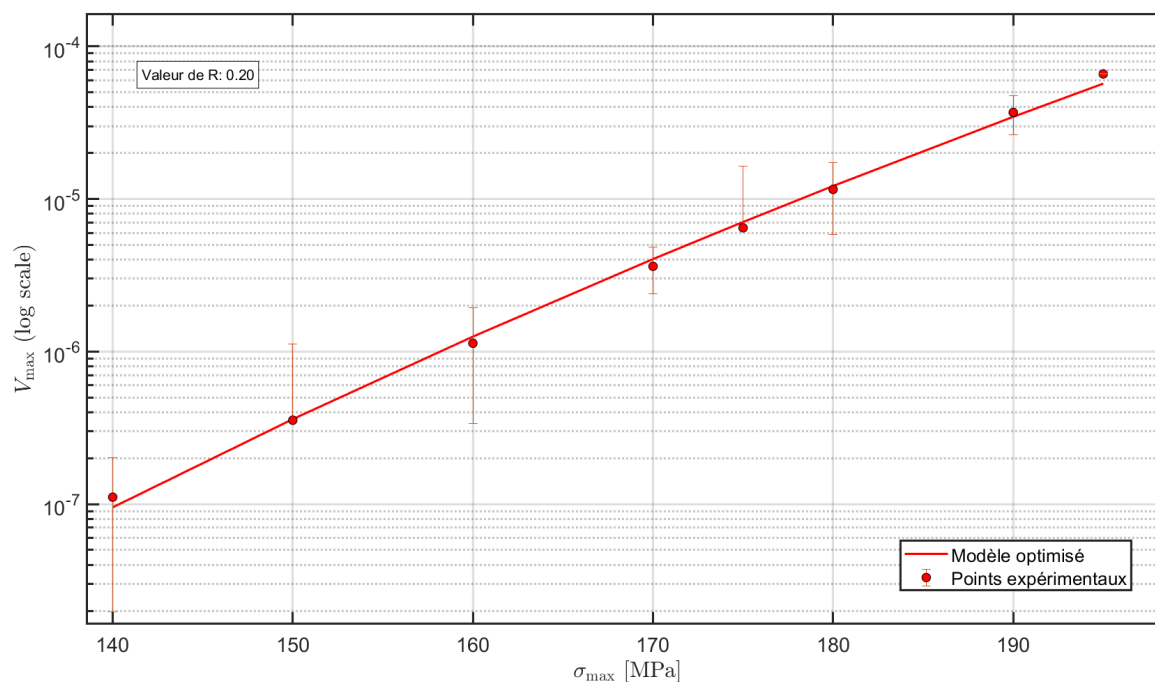


FIG. 2. – Évolution de V_{max} en fonction de σ_{max} pour un niveau de contrainte donnée, comparaison avec une loi de Norton, $R = 0.2, 0^\circ, 0 \text{ RH}$

pour un R donné. Il convient alors de modifier ou d'adapter cette loi pour qu'elle puisse être également sensible à R ou à une variable corrélée à R . Partant de ce constat, il est nécessaire de trouver une loi de comportement sensible à R ou à une variable liée à celui-ci.

4. Conclusion

Cette étude ouvre de nouvelles perspectives quant à la prédiction de durée de vie en fatigue et fluage, basée sur une loi de comportement simple. Une méthodologie de post-traitement des données originale a été mise en place dans la perspective de déterminer une loi de comportement adaptée. La modélisation unidimensionnelle a mis en évidence la nécessité d'adopter des lois capables de capturer les effets du rapport de charge sur V_{max} .

Il faut toutefois bâtir ce modèle sur des données fiables et robustes en séparant au mieux les incertitudes épistémiques, liées à la méthodologie, des incertitudes stochastiques, propres aux variabilités de la matière.

Remerciements

Les auteurs tiennent à exprimer leur gratitude aux équipes du laboratoire de l'ESTACA Laval et du Centre des Matériaux de Mines Paris - PSL.

Références

- [1] Francesco E. Fiorini, Luca M. Martulli, Philippe Steck, and Andrea Bernasconi. A modified energy-based fatigue parameter for short fiber reinforced polymers : Performance analysis with varying thicknesses, load ratios, and fiber orientations. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 46(9) :3372–3386, 2023.
- [2] Nathan Fouchier. *Approche intégrée pour estimer la durée de vie en fatigue de pièces thermo-plastiques renforcés fibres courtes dans un cadre viscoélastique haute température*. PhD thesis, 2019.

- [3] S. Gillet, F.L. Taussé Kamdoun, N. Bedrici, S. Joannès, and L. Laiarinandrasana. Cyclic creep strain rate criterion for short-fibre reinforced thermoplastics : Validation of creep and fatigue performance across a wide range of load ratios. *International Journal of Fatigue*, 183 :108257, 2024.
- [4] Nanying Jia and Val A. Kagan. Mechanical Performance of Polyamides with Influence of Moisture and Temperature – Accurate Evaluation and Better Understanding. In *Plastics Failure Analysis and Prevention*, pages 95–104. Elsevier, 2001.
- [5] P.K Mallick and Yuanxin Zhou. Effect of mean stress on the stress-controlled fatigue of a short E-glass fiber reinforced polyamide-6,6. *International Journal of Fatigue*, 26(9) :941–946, September 2004.
- [6] I. Raphael, N. Saintier, H. Rolland, G. Robert, and L. Laiarinandrasana. A mixed strain rate and energy based fatigue criterion for short fiber reinforced thermoplastics. *International Journal of Fatigue*, 127 :131–143, October 2019.
- [7] P. Santharam, Y. Marco, V. Le Saux, M. Le Saux, G. Robert, I. Raoult, C. Guévenoux, D. Taveau, and P. Charrier. Fatigue criteria for short fiber-reinforced thermoplastic validated over various fiber orientations, load ratios and environmental conditions. *International Journal of Fatigue*, 135 :105574, June 2020.