



**HAL**  
open science

## Détermination rapide des propriétés de fatigue des structures en composites stratifiés multidirectionnels basée sur la thermographie infrarouge

Xiaojing Gong, Marie-Laetitia Pastor, Christian Garnier, Zijiao Jia, Jia Huang

### ► To cite this version:

Xiaojing Gong, Marie-Laetitia Pastor, Christian Garnier, Zijiao Jia, Jia Huang. Détermination rapide des propriétés de fatigue des structures en composites stratifiés multidirectionnels basée sur la thermographie infrarouge. CNRIUT 2023 Saint Pierre - La Réunion, IUT de Saint Pierre, Jun 2023, Saint Pierre (La Réunion), La Réunion. hal-04326809

**HAL Id: hal-04326809**

**<https://hal.science/hal-04326809v1>**

Submitted on 6 Dec 2023

**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.

---

# Détermination rapide des propriétés de fatigue des structures en composites stratifiés multidirectionnels basée sur la thermographie infrarouge

---

Xiaojing Gong<sup>1</sup>

[xiaojing.gong@iut-tarbes.fr](mailto:xiaojing.gong@iut-tarbes.fr)

Marie-Laetitia Pastor<sup>1</sup>

[marie-laetitia.pastor@iut-tarbes.fr](mailto:marie-laetitia.pastor@iut-tarbes.fr)

Christian Garnier<sup>2</sup>

[christian.garnier@enit.fr](mailto:christian.garnier@enit.fr)

Zijiao Jia<sup>1</sup>

[zijiao.jia@iut-tarbes.fr](mailto:zijiao.jia@iut-tarbes.fr)

Jia Huang<sup>3</sup>

[jiahuang@nwpu.edu.cn](mailto:jiahuang@nwpu.edu.cn)

<sup>1</sup> IUT Tarbes, Université de Toulouse III  
Institut Clément Ader (ICA), CNRS, UMR 5312

<sup>2</sup> Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT)  
Laboratoire génie de production (LGP)

<sup>3</sup> School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China

**Thèmes** – Matériaux - Mécanique

**Résumé** – *Le présent travail vise à développer des méthodologies permettant d'évaluer les propriétés en fatigue des composites stratifiés multidirectionnel (MD) en un temps court à partir de l'analyse des données thermographiques mesurées par une caméra infrarouge. Une nouvelle méthode de détermination de la limite de fatigue a été proposée pour surmonter les limites des méthodes graphiques proposées par Risitano et al. [1] et Luong et al. [2]. Un modèle de prédiction de la durée de vie a été développé afin de tracer les courbes S-N avec une précision satisfaisante. La méthode a été appliquée avec succès non seulement aux MD composites stratifiés sollicités en traction, mais également en compression et en compression après impact. La méthode développée est intéressante d'un point de vue industriel car elle permet de gagner un gain de temps considérable (au moins 50 fois) sur la durée des essais de fatigue d'un matériau. Elle peut appliquer à un MD composites stratifié quels que soient sa séquence d'empilement et son type de chargement.*

**Mots-Clés** – Thermographie Infrarouge, Limite de Fatigue, Prédiction de la Durée de Vie, Composite Stratifié Multidirectionnel

## 1 Introduction

Sous une sollicitation répétée, la résistance mécanique d'un matériau diminue avec l'augmentation du nombre de cycles effectués. C'est le phénomène de la fatigue des matériaux, qui est en général caractérisée par une courbe S-N (Stress-Cycle). La détermination d'une courbe S-N par des essais conventionnels peut durer plusieurs mois, donc très long et coûteux. L'approche thermographique, qui corrèle l'augmentation de la température mesurée sur une fenêtre de la surface des éprouvettes avec les paramètres de fatigue [1][2], permet la détermination d'une courbe S-N en une dizaine heures. Cette méthode a été proposée d'abord pour des matériaux métalliques et appliquée récemment sur des matériaux composites à renforts de fibres longues [3-7].

Dans ce travail, nous voulons développer cette méthode pour appliquer à un stratifié multidirectionnel quelconque sous une sollicitation en traction et en compression cyclique.

## 2 Expérimentation

Différents stratifiés MD CFRP ont été préparés à partir d'un préimprégné de fibre de carbone unidirectionnelle et de l'époxy (38%/UD150/CHS, HexPly®M79). Un stratifié [(0/90)<sub>2</sub>/0/(90/0)<sub>2</sub>] est destiné aux essais de traction et trois stratifiés quasi-isotropes et quasi-homogènes (QIQH) (voir Tableau1) sont destinés aux essais de compression ou de compression après impact. Ces trois stratifiés sont non-couplés et ils ont tous les mêmes rigidités dans le plan et hors plan. Les éprouvettes ont été découpées au jet d'eau abrasif aux dimensions respectant les normes.

**Tableau 1** Séquences d'empilement des stratifiés quasi-isotropes et quasi-homogènes (QIQH)

| Eprouvettes | Séquences d'empilement  |
|-------------|---|
| QIQH-1      | [0/45/90/-45/90/-45/45/-45/0/90/0/45/0/45/-45/45/90/0/90/-45/90/-45/0/45] |
| QIQH-2      | [0/45/-45/90/-45/90/45/90/0/-45/0/45/0/45/90/45/-45/0/-45/90/-45/90/0/45] |
| QIQH-3      | [0/90/45/-45/45/-45/90/-45/0/45/0/90/0/90/-45/90/45/0/45/-45/45/-45/0/90] |

Dans un premier temps, le stratifié [(0/90)<sub>2</sub>/0/(90/0)<sub>2</sub>] a été testé en traction statique pour déterminer sa contrainte ultime. Il a ensuite été soumis à des essais de fatigue conventionnels et aussi à des essais de fatigue par block de chargement en utilisant la méthode de la thermographie infrarouge avec R=0.1, f=5Hz afin de valider les méthodologies proposées. Dans un second temps, cette méthode de la thermographie infrarouge validée a été appliquée aux trois stratifiés QIQH sous compression cyclique et aussi sous compression après impact avec R=10 et f=5Hz.

## 3 Modèles proposés

### 3.1 Limite de fatigue [8]

D'habitude, la limite de fatigue, peut être définie par un niveau de contrainte en % par rapport à la contrainte ultime statique pour un nombre de cycles conventionné entre 10<sup>6</sup>-10<sup>7</sup>. Dans cette étude, le changement d'angle normalisé ( $\theta^c_i$ ), déterminé à partir de la courbe de la variation de température stabilisée ( $\Delta T$ ) en fonction du niveau de contrainte (Figure 1), est utilisé pour déterminer la limite de fatigue. Ce paramètre  $\theta^c_i$  s'exprime par

$$\theta^c_i = \left| \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{\max(\theta_{2,3,4..}) - \min(\theta_{2,3,4..})} \right| (i \geq 2)$$

Où l'indice  $i(i \geq 2)$  désigne le numéro du point dans la séquence.  $\theta_i$  et  $\theta_{i+1}$  sont les angles entre la ligne déterminée par l'ensemble de points  $\{P_{i-1}, P_i\}$ ,  $\{P_i, P_{i+1}\}$  et l'axe des x, respectivement. Le terme  $\max(\theta_{2,3,4..}) - \min(\theta_{2,3,4..})$  est utilisé pour la normalisation du changement d'angle.

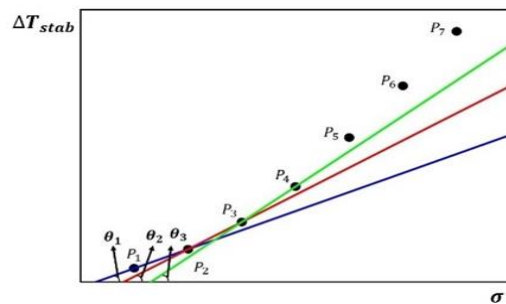


Figure 1 – Définition de l'angle  $\theta_i$

Nous avons proposé d'identifier la limite de fatigue par le point qui correspond à la valeur maximale du changement d'angle normalisé. Cette idée a été validée par les données issues de la littérature.

### 3.2 Durée de vie en termes de « Courbe S-N » [9]

Concernant la courbe S-N, un modèle empirique a été proposé et puis adapté à des MD stratifiés. La courbe S-N peut être tracer à partir du modèle exprimé par les équations suivantes :

$$k(N) = 1 - p \Delta T_{stab}^r N^{1/q}$$

$$N_f = \left( \frac{1 - k_f}{p \Delta T_{stab} (\sigma)^r} \right)^q$$

Où N est le nombre de cycle de chargement,  $k(N)$  et  $k_f$  sont la rigidité résiduelle correspondant au Nième cycle et au cycle final avant la rupture  $N_f$ , respectivement. Trois paramètres p, q et r sont à déterminer empiriquement. La valeur de ces trois paramètres peut être calibrée en ajustant les données expérimentales à l'aide de MATLAB.

## 4 Résultats et discussions

La figure 2 présente la courbe S-N prédite par le modèle proposé avec les résultats des essais de fatigue traditionnels. On voit clairement que la courbe S-N

prédite à  $N_f=10^6$  cycles est relativement conservatrice, tandis que la courbe S-N à  $N_f=10^7$  cycles se situe totalement dans l'intervalle de confiance à 95 %.

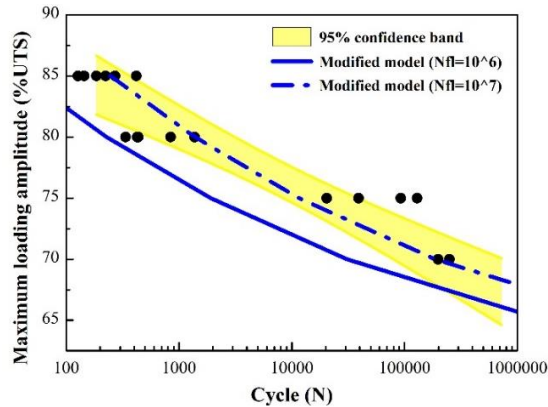


Figure 2- Comparaison de la courbe S-N prédite par le modèle proposé avec les résultats des essais de fatigue traditionnels

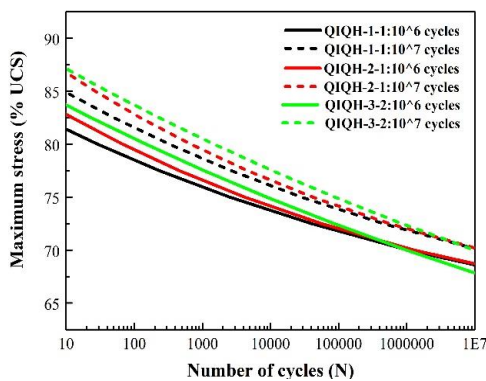


Figure 3- Les courbes S-N prédites par le modèle proposé pour les stratifiés QIQH non impactés

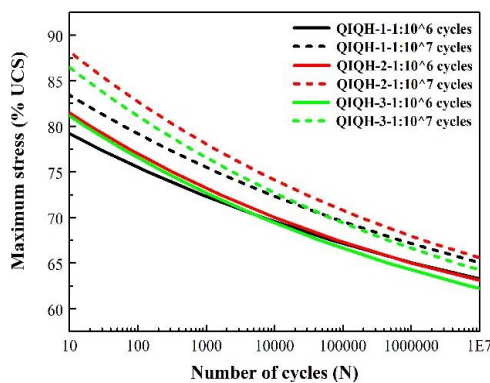


Figure 4 - Les courbes S-N prédites par le modèle proposé pour les stratifiés QIQH impactés

L'application de cette méthode sur les essais de fatigue en compression et en compression après impact sur les trois QIQH stratifiés donne également des résultats intéressants (Figure 3-4). Il est montré que malgré les processus d'endommagement différents d'un stratifié à l'autre, la limite de fatigue ainsi que la courbe S-N des trois séquences d'empilement s'avèrent proches les unes des autres pour les éprouvettes vierges (Figure 3) et aussi

pour elles impactées (Figure 4).

## 5 Conclusions

La détermination rapide des propriétés en fatigue des composites est primordiale, car le comportement en fatigue d'un composite stratifié n'est pas seulement influencé par les paramètres de chargement, mais également par divers facteurs matériaux tels que : fibre et matrice, architecture de renforcement, géométrie, séquence d'empilement, etc.

Une nouvelle méthode de détermination de la limite de fatigue a été proposée pour surmonter la limite des méthodes graphiques de la littérature lorsque les données thermographiques impliquent une fluctuation ou ne satisfont pas l'hypothèse de ces méthodes. Concernant la détermination de la courbes S-N, le modèle proposé intègre trois constantes empiriques permet de traduire mieux les mécanismes d'endommagement compliqués dans les MD stratifiés. Ces modèles proposés, qui combine la dégradation de la rigidité avec des données thermographiques, ont été appliqués avec succès à des MD stratifiés sous sollicitations cycliques en traction, en compression et en compression post-impact. Les résultats obtenus sont convaincants et prometteurs. En utilisant la méthode proposée, une courbe S-N peut être obtenue en une dizaine heures au lieu de plusieurs mois selon la méthode d'essais classiques.

## Références

- [1] Risitano A, Risitano G. Cumulative damage evaluation of steel using infrared thermography. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2010, 54(2): 82-90.
- [2] Luong M P. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals. *Nuclear engineering and design*, 1995, 158(2-3): 363-376.
- [3] Jia Z. Determination of fatigue properties of MultiDirectional composite laminates (MD) based on thermography measurements. *Doctoral dissertation, Toulouse 3*, 2022.
- [4] Colombo C, Libonati F, Pezzani F, Salerno A, Vergani L. Fatigue behaviour of a GFRP laminate by thermographic measurements. *Procedia Engineering*, 2011, 10: 3518-3527.
- [5] Huang J, Pastor M L, Garnier C, Gong X. Rapid evaluation of fatigue limit on thermographic data analysis. *International Journal of Fatigue*, 2017, 104: 293-301.
- [6] Huang J, Pastor M L, Garnier C, Gong X. A new model for fatigue life prediction based on infrared thermography and degradation process for CFRP composite laminates. *International Journal of Fatigue*, 2019, 120: 87-95.
- [7] Huang J, Garnier C, Pastor M L, Gong X. Investigation of self-heating and life prediction in CFRP laminates under cyclic shear loading condition based on the infrared thermographic data. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 229: 106971.
- [8] Zijiao Jia, Marie-Laetitia Pastor, Christian Garnier, Xiaojing Gong. A new method for determination of fatigue limit of composite laminates based on thermographic data. *International Journal of Fatigue*, 2022: 107445.
- [9] Zijiao Jia, Marie-Laetitia Pastor, Christian Garnier, Xiaojing Gong. Fatigue life prediction based on infrared thermographic data for CFRP composite laminates. (Submitted)