

Investigation thermomécanique pour le dimensionnement en fatigue des composites tissés 3D

L. NAVRATIL^{a,b}, Y. MARCO^a, V. LE SAUX^a, S. LECLERCQ^b, N. CARRERE^c

a. ENSTA Bretagne, IRDL, UMR CNRS 6027

2, rue François Verny, 29806 Brest cedex 9

Email : libor.navratil@ensta-bretagne.org, yann.marco@ensta-bretagne.fr,
vincent.le_saux@ensta-bretagne.fr

b. Safran Landing Systems

Vélizy-Villacoublay

Email : sylvain.leclercq@safrangroup.com

c. Safran Composites

Itteville

Email : nicolas.carrere@safrangroup.com

Résumé :

Cette étude porte sur un matériau composite tissé 3D générique à matrice organique développé par le groupe Safran. L'approche présentée est basée sur l'analyse de l'auto-échauffement du matériau sous sollicitations cycliques et vise une détermination rapide de la tenue en fatigue. Pour atteindre cet objectif, deux axes d'études principaux sont investigués : la caractérisation de la relation entre la signature thermomécanique du matériau sous chargements cycliques et les mécanismes dissipatifs à l'échelle mésoscopique et l'établissement d'un critère de fatigue à partir de l'analyse des essais d'auto-échauffement sous sollicitations cycliques.

Abstract:

This study focuses on a three dimensional woven composite with an organic matrix that was developed by the Safran group. The approach presented is based on the analysis of the heat build-up phenomenon occurring under a cyclic loading and aims to characterize fatigue properties of the material in a rapid manner. In order to achieve this goal, two main areas are investigated: the characterization of the relation between the thermomechanical signature and the dissipative mechanisms under cyclic loading and the implementation of a fatigue criterion based on the analysis of self-heating experiments.

Mots clefs : auto-échauffement, fatigue, composites tissés, caractérisation rapide

1 Introduction

1.1 Contexte industriel

Un des défis majeurs de l'industrie aéronautique réside dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Afin d'atteindre cet objectif, de plus en plus d'attention est accordée aux matériaux composites qui remplacent les matériaux métalliques afin d'alléger les structures des avions. Dans cette logique Safran cherche à utiliser des composites tissés 3D à matrice organique qui permettent de pallier le problème de délaminage qui peut être présent (notamment suite à un impact) lors de l'emploi des composites stratifiés qui sont les composites les plus communément utilisés. [1], [2]

1.2 Objectif : caractérisation rapide en fatigue des tissés 3D

Cette étude porte sur un matériau composite tissé 3D générique. Pour utiliser ce matériau, il est primordial d'appréhender le comportement de celui-ci en fatigue sous sollicitations représentatives des conditions de service. Il a été décidé de s'appuyer sur les approches basées sur l'analyse d'auto-échauffement pour identifier la tenue en fatigue de manière rapide. Pour atteindre cet objectif, deux axes d'études principaux sont suivis : la caractérisation de la relation entre la signature thermomécanique et les mécanismes dissipatifs à l'échelle mésoscopique et l'établissement d'un critère de fatigue proposé à partir de l'analyse des essais d'auto-échauffement.

Il est à préciser que pour des raisons de confidentialité tous les résultats présentés dans cet article sont adimensionnés par des constantes choisies arbitrairement.

2 Auto-échauffement

2.1 Principe et hypothèses de la méthode

La méthode d'auto-échauffement cherche à caractériser les propriétés du matériau en fatigue de manière rapide. Le cœur de cette méthode repose principalement sur l'analyse de la variation de la température du matériau sous chargements cycliques. Cette variation peut être causée par différentes sources thermiques. L'objectif consiste, dans un premier temps, à identifier les sources thermiques liées aux irréversibilités (dissipation intrinsèque) pour un chargement cyclique à une contrainte donnée en résolvant l'équation de la chaleur déduite des deux premiers principes de la thermodynamique et puis, dans un second temps, à relier cette dissipation à la durée de vie du matériau sous cette configuration via un critère énergétique.

2.2 Génération d'une courbe d'auto-échauffement

Comme résumé sur la Figure 1, une succession de blocs de chargement cyclique d'amplitude croissante pilotée en effort est appliquée. Chaque bloc comprend plusieurs dizaines de cycles avec un rapport de charge constant $R = 0.05$ ($R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$). Les blocs de chargement sont séparés par des périodes de refroidissement à effort nul et sont espacés d'une durée suffisante pour retourner à l'équilibre thermique. Lorsque l'éprouvette est sollicitée, la réponse thermique sur la zone utile de l'éprouvette est observée avec une caméra infrarouge. Grâce à certaines hypothèses et en prenant un maximum précautions expérimentales, il est possible de considérer la forme simplifiée de l'équation de la chaleur [3] :

$$\theta = T - T_0 = \frac{f}{\rho c_p} \Delta^* \times t + C_e \sin(f \times t + \varphi) \quad (\text{Eq. 1})$$

avec la température initiale T_0 , la fréquence de la sollicitation mécanique f , la masse volumique ρ , la chaleur spécifique c_p , l'amplitude du couplage thermoélastique C_e , et le déphasage entre la sollicitation mécanique et l'acquisition thermique φ . La dissipation moyenne par cycle est notée par Δ^* .

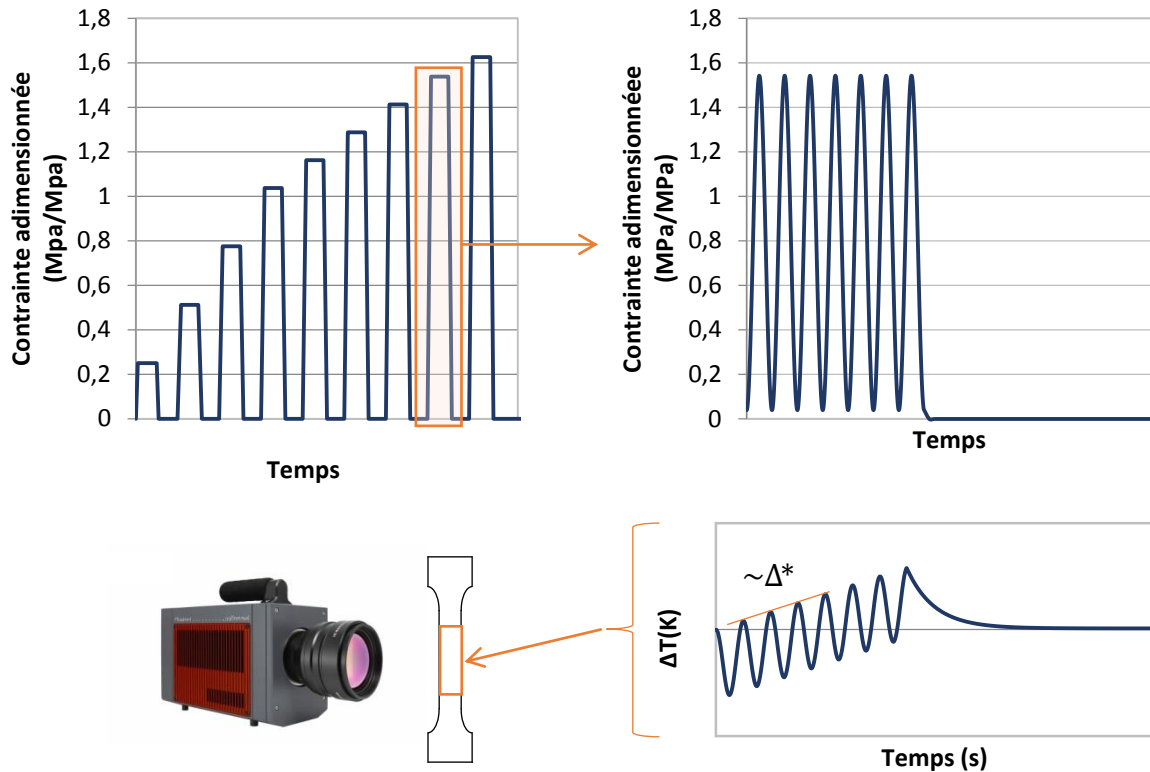


Figure 1: Illustration du protocole expérimental associé à un essai d'auto-échauffement

La courbe d'auto-échauffement est ensuite obtenue en traçant la valeur de la dissipation moyenne en fonction de l'amplitude de contrainte du chargement cyclique appliqué dans le bloc de chargement.

3 Identification d'un critère de dimensionnement énergétique

L'essai d'auto-échauffement permet d'établir la relation entre l'amplitude de contrainte et l'énergie dissipée. L'étape suivante est d'instaurer un lien entre le nombre de cycle jusqu'à la rupture à l'énergie dissipée par cycle via un critère énergétique. Le critère adopté a montré son efficacité pour prédire la durée de vie de différents matériaux (métaux, élastomères, thermoplastiques renforcés à fibres courtes) [3], [4], [5], et il s'écrit sous la forme

$$\Delta^* \times N^b = C \quad (\text{Eq. 1})$$

où Δ^* est énergie dissipée obtenue par cycle, N est le nombre de cycles à rupture. C, b sont les paramètres du modèle qui doivent être identifiés. Leur identification se fait à partir de l'analyse de la courbe d'auto-échauffement. Les démarches d'identification reposent généralement sur l'existence de différents régimes dont la définition est basée sur le changement brutal de la pente que l'on détecte sur

la courbe d'auto-échauffement. Cette identification est graphiquement illustrée sur la Figure 2. Afin de pouvoir identifier les paramètres du modèle, il est nécessaire de connaître deux couples (Δ^*, N) .

1. Le premier couple est fourni par la courbe d'auto-échauffement en prenant le nombre de cycles à rupture du dernier palier N_R et la dissipation intrinsèque moyenne par cycle mesurée pendant ce palier Δ_R^*
2. Le deuxième couple est identifié à partir de l'intersection des droites décrivant les deux premiers régimes. Ce point d'intersection est associé empiriquement à 2000 cycles à rupture, $(\Delta_{2000}^*, N_{2000})$. Il est à préciser que cette valeur est une valeur normalisée et ne représente pas une durée de vie réelle.

L'identification du deuxième couple reste discutable tant que les mécanismes physiques à l'origine de cette dissipation ne sont pas identifiés. Cependant il a été montré que ce dépouillement empirique donne de bonnes corrélations avec les résultats de fatigue expérimentaux [6], [7].

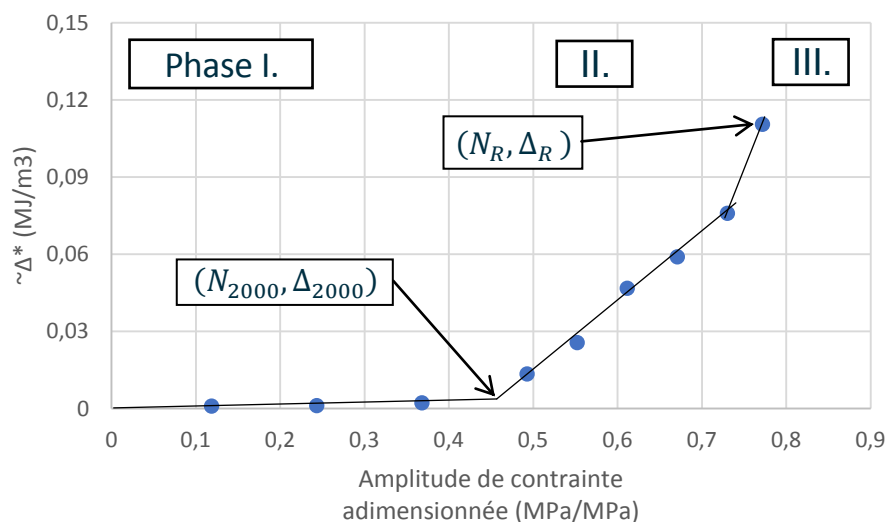


Figure 2 : Illustration de l'identification du critère énergétique

Les deux couples de valeurs étant connus $(\Delta_{2000}^*, N_{2000})$, (Δ_R^*, N_R) , il est possible d'identifier les paramètres du modèle et de tracer la courbe d'endurance déterministe. La Figure 3 confronte cette courbe d'endurance avec les résultats de fatigue. On remarque que le critère identifié approxime bien les données expérimentales.

4 Conclusions

Cette étude vise à caractériser le comportement des composites tissés 3D de manière rapide en se basant sur l'analyse des essais d'auto-échauffement sous sollicitations cycliques. La génération de la courbe d'auto-échauffement à partir de la variation de la température moyenne dans la zone utile a été illustrée. Il a été montré que la dissipation évolue en fonction de l'amplitude de la contrainte appliquée. Il reste dans les perspectives d'évaluer la contribution des différents mécanismes dissipatifs sur la dissipation totale et de décrire leurs évolutions en fonction de la contrainte et durant la sollicitation cyclique. Il a aussi été montré que le critère de fatigue identifié à partir d'un dépouillement empirique montre une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.

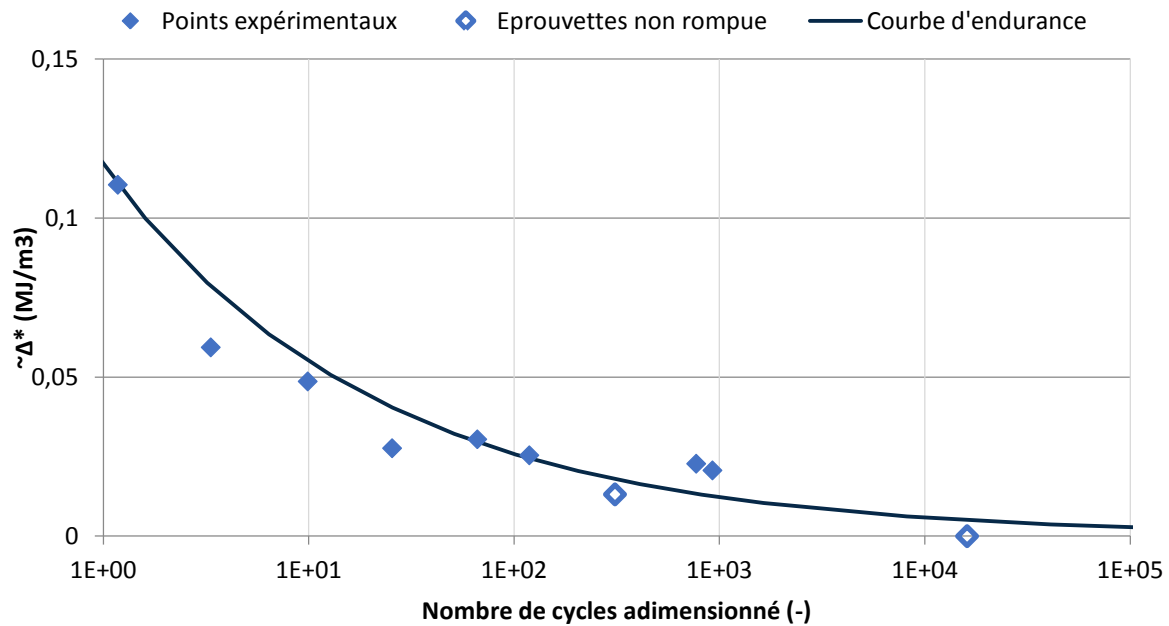


Figure 3 : Confrontation de la courbe d'endurance avec des essais de fatigue

Références :

- [1] C. Rakotoarisoa, *Prévision de la durée de vie en fatigue des composites à matrice organique tissés interlock*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, (2013)
- [2] C. El-Hage, *Modélisation du comportement élastique endommageable de matériaux composites à renfort tridimensionnel*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, (2006)
- [3] C. Doudard, *Détermination rapide des propriétés en fatigue à grand nombre de cycles à partir d'essais d'échauffement*. (2004)
- [4] L. Leveuf, *Caractérisation et modélisation du comportement mécanique et de la tenue en fatigue d'un composite thermoplastique à fibres de carbone courtes pour applications aéronautiques*. Thèse de doctorat (2017)
- [5] I. Masquelier, *Influence of the formulation on the fatigue properties of elastomeric materials*. Thèse de doctorat (2014)
- [6] L. Leveuf, Y. Marco, V Le Saux, J. Olhagaray, S. Leclercq, *Characterization of the fatigue properties on a short carbon fiber reinforced thermoplastic based on the heat build-up protocol*. 10th International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting. ACE-X (2016), Split, Croatia
- [7] L. Leveuf, Y. Marco, V. Le Saux, L. Navratil, S. Leclercq, J. Olhagaray, *Fast screening of the fatigue properties of thermoplastics reinforced with short carbon fibers based on a heat build-up protocol*. 12th International Fatigue Congress. FATIGUE (2018)