

# Apport de la mesure de température pour le dimensionnement en fatigue des composites tissés 3D

## *Contribution of the temperature measurements to the fatigue design of woven composites*

L. Navrátil<sup>1,2</sup>, Y. Marco<sup>1</sup>, V. Le Saux<sup>1</sup>, S. Leclercq<sup>2</sup>, N. Carrere<sup>3</sup>

1 : ENSTA Bretagne, IRDL, UMR CNRS 6027  
Adresse, 2, rue François Verny, 29806 Brest cedex 9  
e-mail : libor.navratil@ensta-bretagne.org, yann.marco@ensta-bretagne.fr, vincent.le\_saux@ensta-bretagne.fr

2 : Safran Landing Systems  
Adresse, Vélizy-Villacoublay  
e-mail : sylvain.leclercq@safrangroup.com

3 : Safran Composites  
Adresse, Itteville  
e-mail : nicolas.carrere@safrangroup.com

### Résumé

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 portée aux matériaux composites qui remplacent les matériaux métalliques afin d'alléger les structures des avions. Dans cette logique, le groupe Safran investigate les possibles applications des composites tissés qui permettent de pallier le problème de délaminage qui est souvent rencontré lors de l'utilisation des composites stratifiés.

Cette étude porte sur un matériau composite tissé 3D générique à matrice organique. 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. Le premier axe cherche à caractériser la relation entre la signature thermomécanique du matériau sous chargement cyclique et les mécanismes dissipatifs à l'échelle mésoscopique. Le second axe vise à établir un critère de fatigue à partir de l'analyse des essais d'auto-échauffement sous sollicitations cycliques.

### Abstract

Reducing greenhouse gases has turned out to be one of the biggest challenges that the aerospace industry is facing these days. In order to achieve this goal, more and more attention is drawn to composite materials that are replacing metals for the sake of reducing the mass of aircrafts. For this reason, the Safran group explores the possible applications of woven composites which are able to avoid the delamination failure that is often encountered in the use of laminated composites.

This study focuses on a three dimensional woven composite with an organic matrix. The approach presented is based on the analysis of the heat build-up phenomenon occurring under cyclic loadings and aims to characterize fatigue properties of the material in a rapid manner. In order for this to be accomplished, the research is divided into two areas. The first objective is to characterize the relation between the thermomechanical signature and the dissipative mechanisms under cyclic loadings on the mesoscopic scale. The second axis seeks to set up a fatigue criterion based on the analysis of self-heating experiments.

**Mots Clés :** auto-échauffement, fatigue, composites tissés, caractérisation rapide

**Keywords:** heat build-up, fatigue life, woven composites, rapid characterization

## **1. Introduction**

### **1.1 Contexte industriel**

Un des défis majeurs des constructeurs et des équipementiers aéronautiques réside dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Afin d'arriver à cet objectif, deux voies sont possibles : (i) augmenter le rendement des systèmes de propulsions, (ii) réduire la masse des aéronefs. La réduction du poids peut se faire par l'optimisation de la conception des structures ou par l'utilisation des matériaux qui offrent un meilleur compromis entre la masse et les performances.

D'une manière générale, les matériaux composites offrent un bon rapport entre les propriétés mécaniques et la masse volumique. Parmi les différentes familles de matériaux composites, les stratifiés unidirectionnels restent les composites les plus utilisés. Ces matériaux sont obtenus par un empilement des plis. En faisant varier les angles et les séquences d'empilement, il est possible d'obtenir une large gamme de propriétés mécaniques. Cependant l'inconvénient majeur de ce type de matériau réside dans la tenue des interfaces. Une décohésion entre deux plis, observé notamment suite à un impact, se révèle critique et provoque rapidement la ruine du matériau. [1-3]

Afin de pallier ce problème de délaminage, depuis quelques années, l'attention se tourne vers les composites tissés 3D. Ce type de matériaux comporte des renforts dans la direction de l'épaisseur ce qui permet d'obtenir une meilleure tenue à l'impact en limitant le délaminage. [1]

### **1.2 Objectif : caractérisation rapide en fatigue**

Dans le contexte présenté précédemment, cette étude porte sur un matériau composite tissé 3D générique développé par le groupe Safran. Pour l'utilisation de 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 sous chargements cycliques 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. Matériau et éprouvettes**

Le matériau étudié est un composite tissé 3D à matrice organique (CMO), constitué d'époxy/carbone. Les composites tissés 3D font partie de la famille des composites à préforme textile qui sont fabriqués avec l'aide d'une machine à tisser.

Les éprouvettes utilisées sont obtenues par découpe dans des plaques. La résine est injectée dans un moule contenant la préforme tissée. Les plaques sont consolidées par le procédé Resin Transfer Molding (RTM) ce qui est un système de moulage à pression.

## **3. Auto-échauffement**

### **3.1 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.

### 3.2 Protocole mécanique

Comme résumé sur la (Fig. 1), le protocole mécanique consiste à appliquer une succession de blocs de chargement cyclique d'amplitude croissante pilotés en effort. 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. Le dernier bloc de chargement est mené jusqu'à la rupture et le nombre de cycle à rupture est relevé.

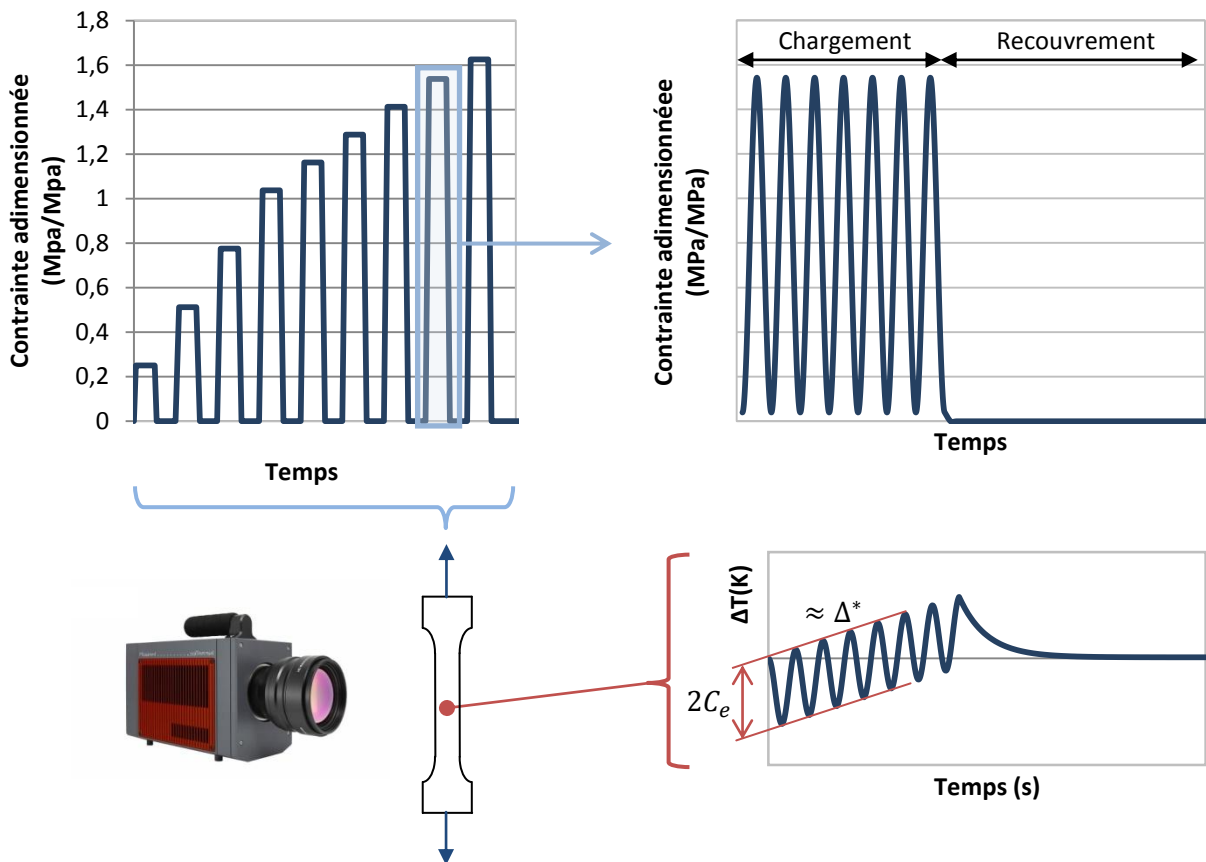


Fig. 1 : Illustration du protocole expérimental associé à un essai d'auto-échauffement

### 3.3 Reconstruction des champs de couplage thermoélastique et d'énergie dissipée

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 (hypothèse de transformation adiabatique, ...) et en prenant un maximum de précautions expérimentales (minimisation des perturbations extérieures, ...), il est possible de considérer que la température évolue selon :

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

avec la température initiale  $T_0$ , la fréquence de la sollicitation mécanique  $f$ , la masse volumique  $\rho$ , la chaleur spécifique  $c_p$ , l'amplitude du couplage thermoélastique  $C_e$ , et le déphasage entre la

sollicitation mécanique et l'acquisition thermique  $\varphi$ . La dissipation moyenne par cycle est notée par  $\Delta^*$ . [4]

En se basant sur l'équation (Eq.1), il est possible de reconstruire des cartographies de dissipation et d'amplitude de couplage thermoélastique à partir des champs de température mesurés. La courbe d'auto-échauffement est ensuite obtenue en traçant la valeur moyenne de l'énergie dissipée en fonction de l'amplitude de contrainte appliquée dans le bloc de chargement (Fig. 2). [5]

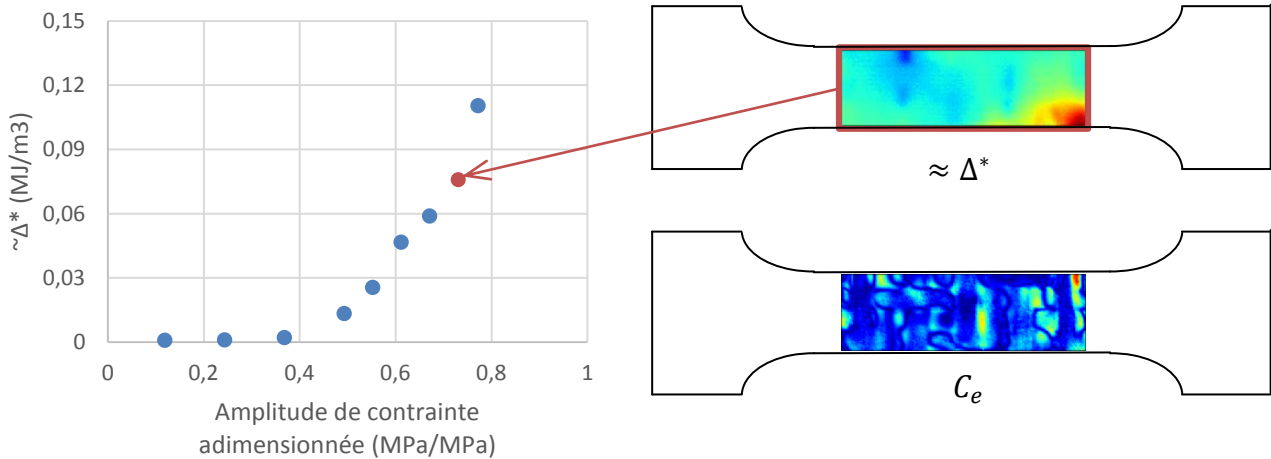


Fig. 2: Illustration de la génération d'une courbe d'auto-échauffement

Cette courbe sera utilisée ultérieurement pour remonter aux propriétés en fatigue.

### 3.4 Description des champs de couplage thermoélastique

Comme introduit précédemment, les outils de thermographie infrarouge permettent d'évaluer l'amplitude du couplage thermoélastique sur l'ensemble de la zone observée. La (Fig. 3) présente le champ de couplage thermoélastique évalué à partir des mesures thermiques effectuées durant le troisième bloc de chargement de l'essai d'auto-échauffement présenté sur la (Fig. 2).

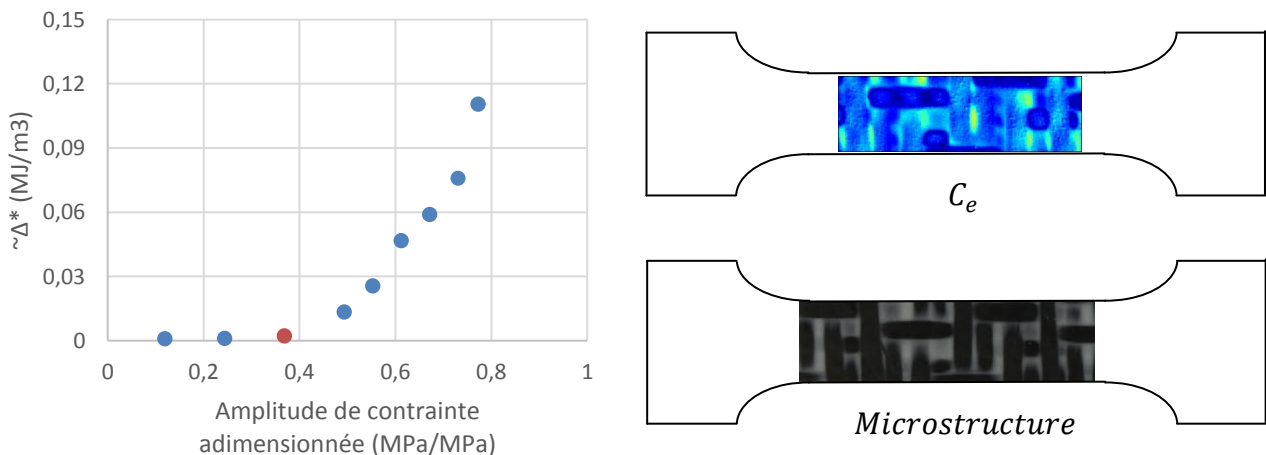


Fig. 3 : Illustration d'une cartographie de couplage thermoélastique en parallèle avec la microstructure dans la zone observée

On remarque que le contraste observé sur la cartographie de couplage thermoélastique ressemble à celui observé sur la photo de l'éprouvette. En effet, la valeur de l'amplitude du couplage thermoélastique est, sous certaines hypothèses [4], directement liée à la valeur de l'amplitude de

contrainte du chargement applique. Etant donné que le matériau étudié est très hétérogène et que les propriétés de la fibre diffèrent de celles de la matrice, le champ de contrainte n'est pas homogène. La contrainte locale varie fortement en fonction de la microstructure. Cette variation est, par conséquent, indirectement observé sur les cartographies de couplage thermoélastique.

### 3.5 Description des champs d'énergie dissipée

La Fig. 4 présente deux illustrations des champs d'énergie dissipée.

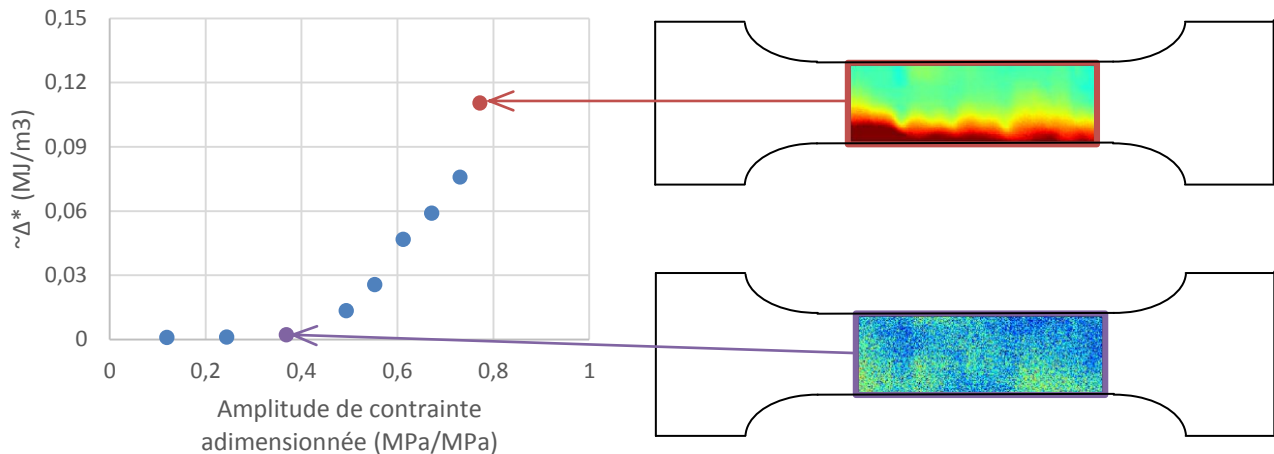


Fig. 4 : Illustration des cartographies d'énergie dissipée

On constate que le champs d'énergie dissipée reste homogène tant que la contrainte appliquée est relativement basse. La cartographie obtenue lors du dernier palier de l'essai indique un champ hétérogène avec le maximum le long du bord de l'éprouvette ce qui pourrait être expliqué par des effets de bords provoqués par usinage.

## 4. Identification d'un critère de dimensionnement énergétique

L'essai d'auto-échauffement met en évidence la relation entre l'amplitude de contrainte et l'énergie dissipée moyenne par cycle. L'étape suivante cherche à instaurer un lien entre le nombre de cycles jusqu'à la rupture à l'énergie dissipée moyenne 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 [4], [6], [5]), et il s'écrit sous la forme

$$\Delta^* \times N^b = C \quad (\text{Eq. 2})$$

où  $\Delta^*$  est énergie dissipée obtenue par cycle,  $N$  est le nombre de cycles à rupture et  $C, b$  sont les paramètres du modèle qui doivent être identifiés. Leur identification se fait à partir de l'analyse de la courbe d'auto-échauffement.

### 4.1 Choix de l'approche d'identification des paramètres du modèle

Les démarches d'identification font généralement hypothèse de l'existence de différents régimes dont la définition se base sur le changement brutal de la pente que l'on détecte sur la courbe d'auto-échauffement. Afin de pouvoir identifier les paramètres du critère, il est nécessaire de connaître deux couples  $(\Delta^*, N)$ .

Le premier couple peut être identifié à partir des informations obtenues lors du dernier palier qui a été mené jusqu'à la rupture. Le nombre de cycle jusqu'à la rupture,  $N_R$ , est associé à la dissipation intrinsèque moyenne par cycle évaluée à partir des mesures thermiques,  $\Delta_R^*$ .

Le deuxième couple est identifié à partir du changement de la pente visible sur la courbe d'auto-échauffement ce qui peut être graphiquement représenté par l'intersection des droites décrivant les deux premiers régimes (Fig. 5). Ce point d'intersection est associé à une valeur de nombre de cycle empirique. Dans le cas présenté, la valeur est normalisée en sorte que le nombre de cycle normalisé associé soit égal à 1.

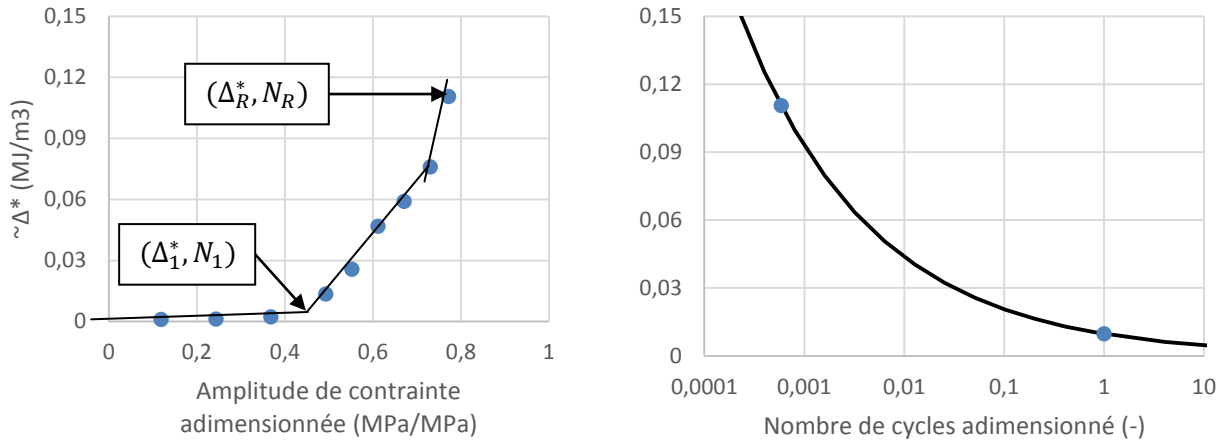


Fig. 5 : Illustration de l'identification du critère énergétique

Les deux couples étant connus, il est possible d'identifier les paramètres du modèle et de tracer la courbe d'endurance déterministe. Il est à remarquer que l'identification du deuxième couple reste discutable tant que les mécanismes physiques à l'origine de cette dissipation ne sont pas connus. La compréhension de ce lien permettrait de proposer des modèles capables de prévoir la courbe de Wöhler et la dispersion associée. Cependant la section suivante montre que le dépouillement empirique donne de bonnes corrélations avec les résultats de fatigue expérimentaux. [7], [8]

#### 4.2 Confrontation avec des résultats de fatigue expérimentaux

La Fig. 6 trace l'énergie moyenne dissipée par cycle en fonction du nombre de cycle jusqu'à la rupture. La valeur de la dissipation est, dans le cas des essais de fatigue, obtenue au début du chargement et de la même façon que pour des essais d'auto-échauffement. Il est ainsi possible de confronter directement les prévisions de la courbe d'endurance avec les résultats de fatigue expérimentaux. On remarque que le critère identifié approxime bien les données expérimentales.

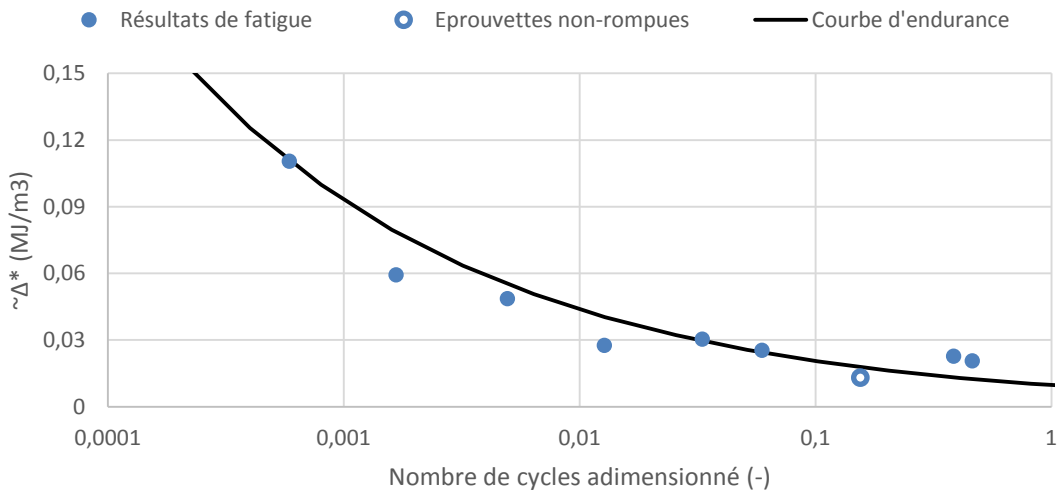


Fig. 6 : Confrontation de la courbe d'endurance avec des essais de fatigue

### 5. Conclusions et perspectives

Cette étude vise à caractériser la tenue en fatigue des composites tissés 3D de manière rapide en se basant sur l'analyse des essais d'auto-échauffement sous sollicitation cyclique. Il ressort que les outils d'analyse mise en place permettent de décrire la réponse thermomécanique (couplage thermoélastique et dissipation) à l'échelle mésoscopique du matériau.

Etant donné que le couplage thermomécanique est directement lié à l'état de contrainte local, les champs de couplage thermoélastique reconstruits à partir des mesures thermiques offrent une base de données à la compréhension et l'alimentation/la validation du modèle thermomécanique. Dans cette logique, il reste dans les perspectives de confronter et éventuellement d'alimenter le comportement élastique des composant du matériau par un dialogue essais/calcul à l'échelle mésoscopique.

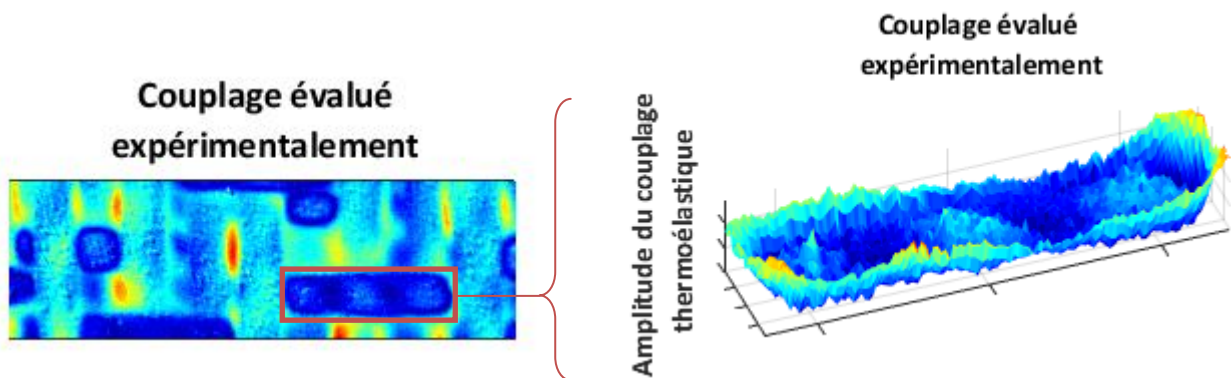


Fig. 7: Illustration d'une cartographie de couplage évaluée à partir des mesures expérimentales avec le détail sur une fibre



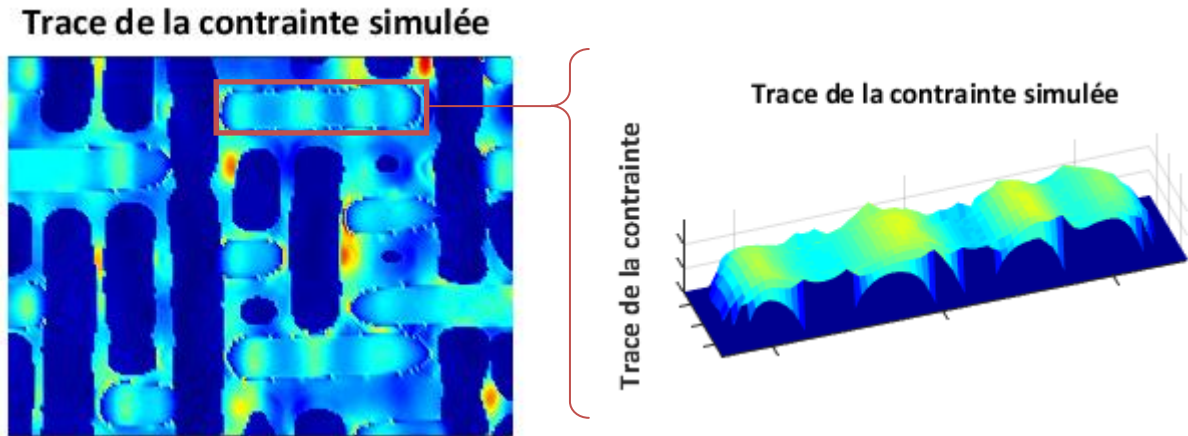


Fig. 8 : Illustration d'une cartographie de trace de contrainte obtenues sur le VER à partir des calculs élastiques avec le détail sur une fibre

De façon similaire, les champs d'énergie dissipée peuvent alimenter la modélisation non-linéaire à l'échelle mésoscopique. Ces champs sont aussi analysés lors de la génération de la courbe d'auto-échauffement qui met en évidence l'évolution de la dissipation en fonction de l'amplitude de la contrainte appliquée. Par ailleurs, il a été montré que le protocole d'auto-échauffement semble pertinent pour ce matériau et que le critère de fatigue identifié à partir d'un dépouillement empirique montre une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.

Il reste dans les perspectives d'identifier les différents mécanismes dissipatifs et d'évaluer leurs contributions sur la dissipation totale. Cela permettra d'ouvrir la voie vers la proposition d'une modèle d'analyse de la courbe d'auto-échauffement capable de dépasser l'approche à seuil empirique.

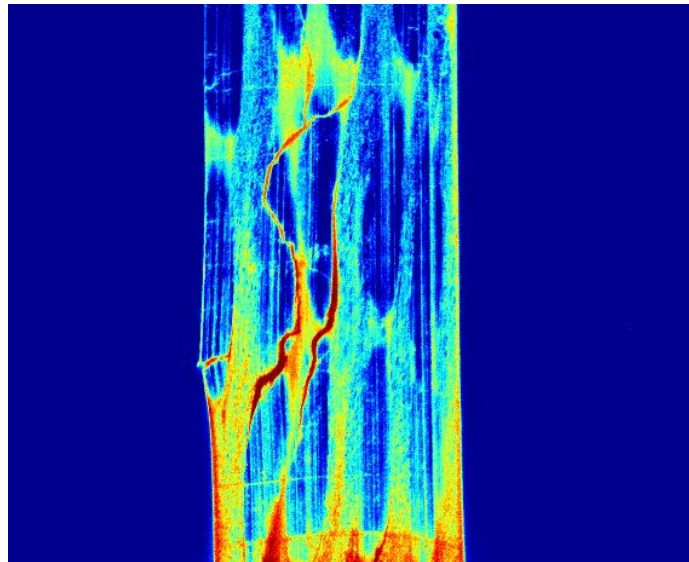


Fig. 9 : Illustration de l'endommagement observé par la caméra infrarouge lors d'un essai d'auto-échauffement

## Références

- [1] A. Hurmane, « Analyse par un dialogue essais/calculs de la tenue en compression de structures composites tissées interlocks », Thèse de doctorat, 2015
- [2] L. Marcin, « Modélisation du comportement, de l'endommagement et de la rupture de matériaux composites à renforts tissés pour le dimensionnement robuste de structures », Thèse de doctorat, 2010



- [3] C. Rakotoarisoa, « Prédiction de la durée de vie en fatigue des composites à matrice organique tissés interlock », Thèse de doctorat, 2014
- [4] C. Doudard, « Détermination rapide des propriétés en fatigue à grand nombre de cycles à partir d'essais d'auto-échauffement », Thèse de doctorat, 2004
- [5] 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
- [6] I. Masquelier, « Influence de la formulation sur les propriétés en fatigue d'élastomères industriels », Thèse de doctorat, 2014
- [7] 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 » *International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting. ACE-X*, Split, Croatia, 2016
- [8] L. Leveuf, Y. Marco, V. Le Saux, L. Navrátil, S. Leclercq, J. Olhagaray, « Fast screening of the fatigue properties of thermoplastics reinforced with short carbon fibers based on thermal measurements. *Polymer Testing* Vol 68. 10.1016/j.polymertesting.2018.03.045.