

## **Influence de la vitesse sur la densité de fissuration mesurée par thermographie infrarouge : de la statique vers la dynamique**

### ***Passive infrared thermography measurement of the strain-rate dependancy of transverse cracking evolution in cross-ply laminates***

**Fabien Coussa<sup>1</sup>, Julien Berthe<sup>1</sup>, Matthieu Ragonet<sup>1</sup> et Adrien Vinel<sup>2</sup>**

1 : ONERA - DMAS - Centre de Lille  
5, rue des Fortifications - CS 90013 - 59045 LILLE CEDEX  
e-mail : fabien.coussa@onera.fr et julien.berthe@onera.fr  
2 : École Centrale de Nantes  
Institut de Recherches en Génie Civil et Mécanique (UMR 6183)  
1 rue de la Noë, B.P. 92101 F-44321 NANTES

### **Résumé**

Suite à l'utilisation accrue des matériaux composites dans l'industrie des transports, de nombreux protocoles expérimentaux ont été proposés afin d'avoir accès à la mesure et à la quantification du mécanisme de fissuration matricielle dans les stratifiés composites. Bien que la robustesse de ces différents protocoles appliqués à différents types de sollicitations quasi-statiques ne soit plus à prouver, ces démarches sont difficilement envisageables dans le cadre d'une sollicitation à hautes ou moyennes vitesses. L'analyse *in situ* de la densité de fissures suivant de multiples niveaux de chargement ou encore l'analyse *ex situ* de la dégradation du matériau suivant un état figé de contraintes ne sont plus réalisables lors d'un chargement à hautes vitesses. L'approche expérimentale proposée dans cette étude repose ainsi sur la détection du mécanisme de fissuration par thermographie infrarouge dans le cadre d'une sollicitation de traction à haute vitesse et monotone jusqu'à rupture. Suivant une large gamme de vitesses et en considérant différentes épaisseurs de stratification, l'objectif consiste à évaluer la capacité de cette méthode à capturer l'apparition du mécanisme de dégradation. Dans un premier temps, la simplicité qu'offre cette méthodologie dans l'analyse directe de la croissance de fissures en fonction d'un état de contrainte est présentée. Dans un second temps, l'influence des effets de vitesses et d'épaisseurs sur la densité de fissuration est présentée.

### **Abstract**

Given the increasing use of composite materials in the transportation industry, several experimental protocols have been proposed to give access to the measurement and the quantification of the matrix cracking mechanisms in composite laminates. Although the reliability of these different protocols applied to different kinds of quasi-static loads is no longer to be proven, these approaches are no longer possible for medium speed loadings. The crack density analysis under various loading levels or the analysis of material degradation under a frozen state of stress are no longer possible at high speed loading. The experimental approach proposed in this study is based on the detection of the cracking mechanisms by infrared thermography in the context of an high speed and monotonous tensile load until failure. Over a wide range of speeds and considering different ply thicknesses, the objective is to evaluate the capability of this method to capture the occurrence of the degradation mechanism. First, the simplicity of this methodology in the direct analysis of crack growth as a function of a stress state is presented. In a second step, the influence of velocity and thickness effects on cracking density is presented.

**Mots Clés :** Composite carbone/epoxy ; Thermographie infrarouge ; Effet de vitesse ; Densité de fissuration matricielle

**Keywords :** CFRP ; Infrared Thermography ; Strain-rate effect ; Matrix crack density

## 1. Introduction

L'utilisation accrue des matériaux composites dans l'industrie des transports et dans le cadre d'applications à des pièces structurantes, a mené à utiliser un panel étendu de techniques expérimentales permettant d'analyser l'évolution du mécanisme de dégradation par fissuration matricielle sous différents types de sollicitations. Dans la gamme des vitesses lentes et quasi-statiques, l'analyse de la densité de fissuration dans les matériaux composites stratifiés croisés a fait l'objet de nombreuses études [1, 2, 3]. La plupart de ces techniques ont été utilisées dans le cadre de sollicitations cyclées où l'interruption de l'essai permet d'observer et de mesurer les mécanismes de dégradation du matériau au cours du chargement. Dans la gamme des vitesses dynamiques, le recours à de tels protocoles reste toutefois limité à cause de l'asservissement en boucle ouverte des moyens dynamiques. Les difficultés liées à l'interruption du chargement avant la rupture de l'échantillon constituent aujourd'hui encore une véritable limite à ce type d'analyse. Dans ces travaux, afin d'analyser l'effet de l'augmentation de la vitesse sur l'évolution de la densité de fissuration en fonction du chargement appliqué, une technique de mesure non-intrusive par thermographie infrarouge (IR) est utilisée. Cette approche a notamment pu être utilisée pour mesurer l'évolution du dommage dans les composites soumis à des chargements statiques [4], de fatigue [5, 6] et plus récemment à des chargements aux vitesses dynamiques intermédiaires [7]. Néanmoins, la détection et la quantification par thermographie IR de fissures transverses pour des chargements dynamiques restent encore peu étudiées dans la littérature du fait des limitations liées à la fréquence d'acquisition des caméras IR d'ancienne génération. Ces travaux proposent ainsi d'étendre l'analyse réalisée à basses vitesses dans les travaux de [8] à des vitesses de sollicitations dynamiques, par le biais de l'utilisation d'une caméra IR haute cadence (Telops FAST M3K).

## 2. Préambule expérimental

### 2.1. Matériau et environnement expérimental

Le matériau considéré dans cette étude est un composite stratifié croisé carbone/epoxy T700/M21. L'influence de l'épaisseur est étudiée en considérant quatre séquences d'empilement et en faisant varier le nombre de plis à  $90^\circ$  au sein de la stratification, tel que :  $[0/90_{1/2}]_S$ ,  $[0/90]_S$ ,  $[0/90_2]_S$  et  $[0/90_3]_S$ . Des éprouvettes rectangulaires d'une longueur utile de 41 mm sont utilisées pour l'ensemble des essais. L'ensemble des essais est réalisé à l'aide d'un vérin servohydraulique (Figure 1) permettant de solliciter les échantillons suivant 5 vitesses ( $5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et  $1.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) afin de couvrir une plage de vitesses de déformation allant de  $\dot{\epsilon} = 2.10^{-3} \text{ s}^{-1}$  à  $\dot{\epsilon} = 35 \text{ s}^{-1}$ . Trois essais au minimum ont été réalisés pour chacune des vitesses et chacune des stratifications. La mesure de charge est réalisée à l'aide d'une cellule d'effort piézoélectrique située entre le mors du

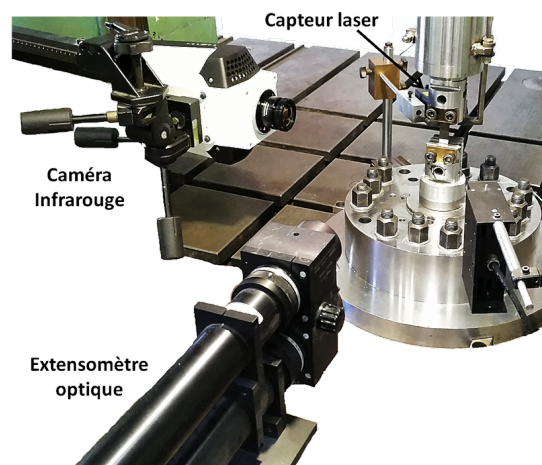


Fig. 1. Environnement expérimental utilisé pour les essais à différentes vitesses

bas et le bâti du montage. La mesure de déformation est réalisée à l'aide d'un extensomètre optique suivant une base de mesure de 32 mm environ. La mesure de déplacement du vérin est assurée par un capteur laser Keyence. Enfin, la mesure de la température apparente est réalisée à l'aide d'une caméra infrarouge Telops Fast M3k permettant d'atteindre une fréquence d'acquisition allant de 3.1 kHz en pleine échelle ( $320 \times 256$  pixels) jusqu'à 100 kHz en échelle réduite ( $64 \times 4$  pixels). Fondé sur l'hypothèse que la propagation d'une fissure est instantanée suivant la largeur de l'échantillon et cela jusqu'à haute vitesse [8], seule la tranche des échantillons est observée par la caméra IR pour l'ensemble de la campagne. Cela permet de réduire la résolution spatiale et d'augmenter la fréquence d'acquisition de la caméra IR. Les paramètres associés à l'acquisition des données thermique sont résumés dans le Tableau 1. L'ensemble des données acquises est synchronisé à l'aide d'un système d'acquisition de données Dewetron à une fréquence d'1 MHz.

Vitesses	Fréquences IR (Hz)	Temps d'intégration ( $\mu$ s)	Résolution (pixels)
$5 \text{ mm.min}^{-1}$	500	180	$320 \times 20$
$50 \text{ mm.min}^{-1}$	4000	190	$320 \times 20$
$500 \text{ mm.min}^{-1}$	5000	190	$256 \times 16$
$0.1 \text{ m.s}^{-1}$	5000	190	$256 \times 16$
$1.4 \text{ m.s}^{-1}$	15000 - 30000	15 - 60	$256 \times 12$

Tab. 1. Paramètre d'acquisition de la caméra infrarouge pour chaque vitesse

## 2.2. Quantification de la densité de fissure

La quantification de la densité de fissure réalisée en quasi-statique par Berthe [8] se fonde sur la détection des événements thermiques apparaissant sur la tranche d'une éprouvette au cours du temps et la détection corolaire des oscillations présentes sur les signaux de charges acquis par la cellule piézoélectrique. D'une part, cette méthode conserve le caractère fastidieux lié au comptage manuel de fissures. D'autre part, les oscillations causées par le mécanisme de fissuration n'apparaissent plus sur les signaux de charge à hautes vitesses, même pour une fréquence d'acquisition de 1 MHz. La méthode d'analyse proposée dans cette étude se fonde sur le suivi au cours du temps d'une ligne de pixels, située au sein des plis à  $90^\circ$  et suivant la totalité de la longueur de la zone utile de l'éprouvette (Figure 2(a)). Étant donné que les stratifiés croisés carbone/epoxy présentent une rupture fragile qui engendre une importante dissipation énergétique, la rupture est nettement visible sur les images infrarouges. Ainsi, la synchronisation temporelle entre les signaux de charge et les images IR se fonde sur la rupture finale de l'échantillon. Les champs de variation de température  $\Delta T$  sont obtenus en réalisant le différentiel de température entre l'instant  $t$  et l'instant  $t_0$  qui correspond à la mise en charge de l'échantillon. Cela permet d'observer la variation de température au cours de l'essai par rapport à une référence initiale. Cette méthode présente ainsi les avantages d'être simple du point de vue du post-traitement et de l'interprétation des données, d'avoir une représentation directe et continue dans le temps de l'évolution de l'apparition des fissures en fonction de la contrainte appliquée à l'échantillon et enfin d'illustrer directement la répartition spatiale des fissures au sein de la longueur utile. Concernant la dernière vitesse considérée dans cette étude, le faible nombre d'images acquises (environ 6 images) ne permet pas une quantification robuste de la densité de fissure (Figure 2(b)). Cette vitesse sera retirée de l'analyse dans la suite.

## 3. Effet de l'épaisseur et de la vitesse

Les courbes de comportement pour l'ensemble des vitesses de l'étude et pour l'ensemble des essais répétés sont illustrées en Figure 3(a), Figure 3(b) et Figure 3(c) pour les stratifications  $[0/90_3]_S$ ,  $[0/90_2]_S$  et  $[0/90]_S$  respectivement. Macroscopiquement, une très faible dispersion expérimentale est

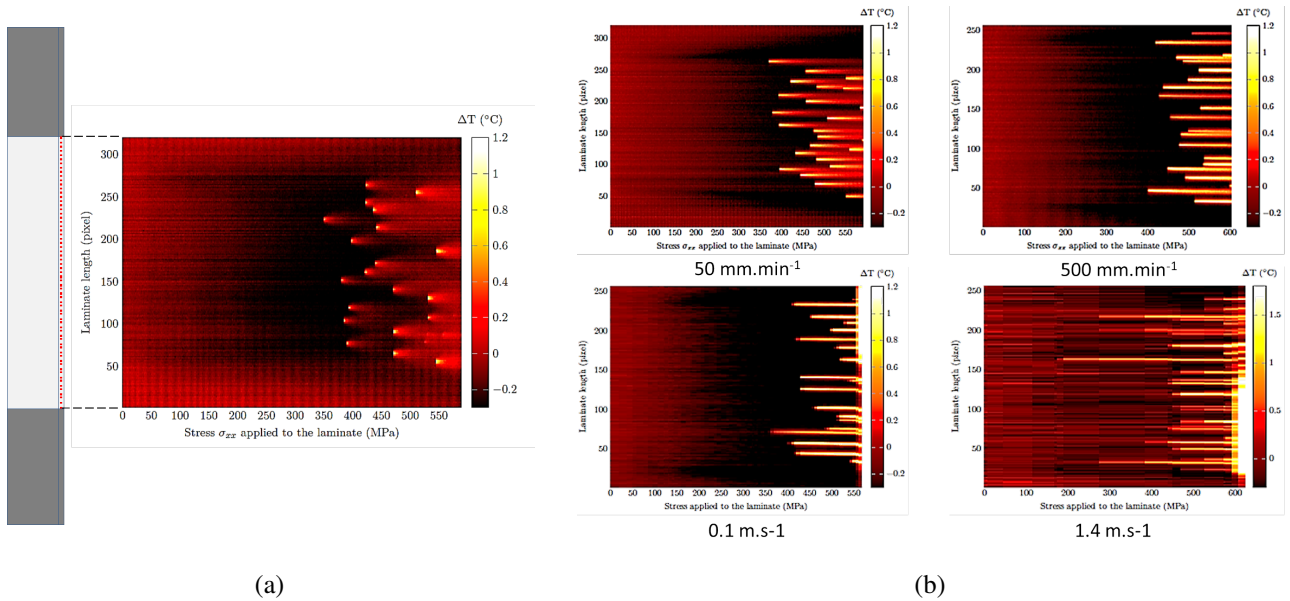


Fig. 2. Stratifié  $[0/90_2]_S$  : a) Schéma de principe et visualisation des mécanismes dissipatifs à  $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , b) Illustration de la méthode suivant plusieurs vitesses

observée et aucun effet de vitesse n'est clairement visible, tant dans le domaine linéaire que non-linéaire. L'apparition du domaine non-linéaire s'effectue pour une contrainte d'environ 300 MPa et 410 MPa pour les configurations  $[0/90_3]_S$  et  $[0/90_2]_S$  respectivement. Ces seuils de non-linéarité en contrainte sont reliés directement à l'initiation et la propagation du mécanisme de fissuration dans les plis orientés à  $90^\circ$  par rapport à l'axe de sollicitation (Figure 3(d) et 3(e)). Aucune non-linéarité n'apparaît suivant la dernière configuration. Ceci s'explique par une contribution majoritaire des deux plis orientés à  $0^\circ$  par rapport à l'axe de sollicitation et de la faible épaisseur du pli à  $90^\circ$ . Concernant

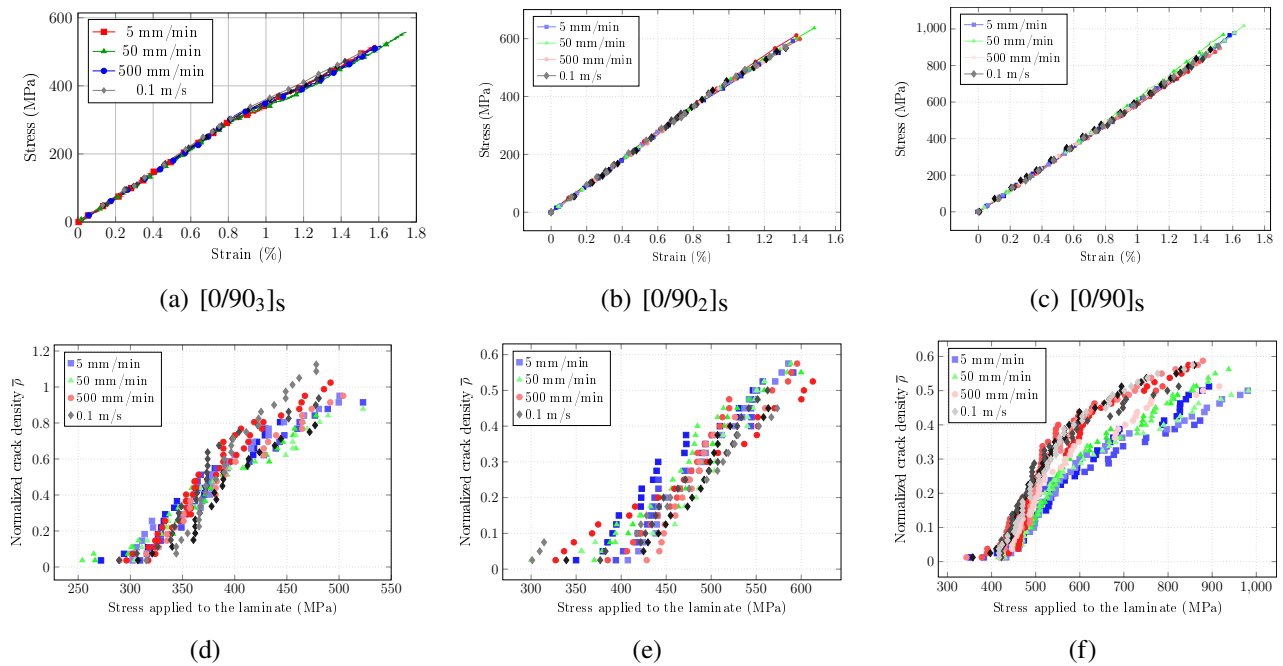


Fig. 3. Comportement macroscopique à différentes vitesses pour différentes configurations de stratifié  $[0/90_n]_S$  (en haut) et évolution de la densité de fissuration transverse en fonction de la contrainte appliquée à différentes vitesses (en bas)

l'influence de l'épaisseur sur la densité de fissuration normalisée  $\bar{\rho}$ , les tendances observées sont en

accord avec celles observées en quasi-statique dans la littérature [9]. Sur la plage de vitesses considérée et compte tenu de la dispersion expérimentale illustrée dans les Figures 3(d), 3(e), il est difficile de conclure quant à un effet significatif de la vitesse sur le mécanisme de fissuration matricielle. Les seuils d'initiation et la cinétique du mécanisme apparaissent comme étant insensible à la vitesse. En revanche et concernant la configuration  $[0/90]_S$  (Figure 3(f)), l'augmentation de la vitesse semble accroître la cinétique d'évolution du mécanisme. Une analyse identique à celle présentée dans ce papier est en cours concernant la configuration  $[0/90_{1/2}]_S$  afin de confirmer cette dernière tendance.

#### 4. Conclusion

Cette étude a permis de valider l'utilisation du protocole de détection du mécanisme de fissuration matricielle par thermographie infrarouge et cela suivant une large gamme de vitesses des domaines quasi-statiques et dynamiques intermédiaires. De plus, une méthodologie d'analyse simple des données thermiques et valable quelque soit la vitesse de sollicitation permet d'aboutir à une représentation visuelle et explicite de l'évolution du mécanisme au sein de l'échantillon en fonction de la contrainte appliquée. Les tendances associées aux effets d'épaisseurs dans cette étude correspondent à celles issues de la littérature et valident ainsi la cohérence de la procédure de quantification. En se focalisant sur le matériau de l'étude et sur la gamme de vitesses considérée, il semble que l'effet de la vitesse sur le mécanisme de fissuration transverse puissent être négligeable jusqu'à une épaisseur de pli critique.

#### Références

- [1] F. Crossman, W. Warren, A. Wang, J. G.E. Law « Initiation and Growth of Transverse Cracks and Edge Delamination in Composite Laminates Part 2. Experimental Correlation », *Journal of Composite Materials* Vol. 14 n° 1, pp. 88–108, 1980.
- [2] Y. Dzenis « Cycle-based analysis of damage and failure in advanced composites under fatigue : 1. Experimental observation of damage development within loading cycles », *International Journal of Fatigue* Vol. 25 n° 6, pp. 499 – 510, 2003, ISSN 0142-1123.
- [3] L. Farge, J. Varna, Z. Ayadi « Damage characterization of a cross-ply carbon fiber/epoxy laminate by an optical measurement of the displacement field », *Composites Science and Technology* Vol. 70 n° 1, pp. 94 – 101, 2010, ISSN 0266-3538.
- [4] T. Lisle, C. Bouvet, P. M.L., P. Margueres, R. Prieto Corral « Damage analysis and fracture toughness evaluation in a thin woven composite laminate under static tension using infrared thermography », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 53, pp. 75–87, 2013.
- [5] L. Toubal, M. Karama, B. Lorrain « Damage evolution and infrared thermography in woven composite laminates under fatigue loading », *International Journal of Fatigue* Vol. 28 n° 12, pp. 1867 – 1872, 2006, ISSN 0142-1123.
- [6] Y. Li, Z. wei Yang, J. tang Zhu, A. bo Ming, W. Zhang, J. yu Zhang « Investigation on the damage evolution in the impacted composite material based on active infrared thermography », *NDT & E International* Vol. 83, pp. 114 – 122, 2016, ISSN 0963-8695.
- [7] G. Battams, J. Dulieu-Barton « Data-rich characterisation of damage propagation in composite materials », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 91, pp. 420–435, 2016.
- [8] J. Berthe, M. Ragonet « Passive infrared thermography measurement of transverse cracking evolution in cross-ply laminates », *Strain* Vol. 54 n° 6.
- [9] C. Huchette « Sur la complémentarité des approches expérimentales et numériques pour la modélisation des mécanismes d'endommagement des composites stratifiés », Ph.D. thesis, Paris 6, 2005.