

Suivi de l'évolution de la fissuration matricielle dans un stratifié à plis croisés sous chargements dynamiques : comparaison des résultats entre la thermographie infrarouge et l'imagerie aux rayons X

Monitoring the evolution of matrix cracking in a cross-ply laminate subjected to dynamic loading : comparison of infrared thermography and X-ray imaging results

Julien Berthe¹, Thomas Fourest¹, Gérald Portemont¹, Bastien Lammens¹, Jesús Pernas-Sánchez², José Alfonso Artero-Guerrero², José Manuel Rodríguez-Sereno², Adrian Cimadevilla², Georg Ganzenmüller³ et Bratislav Lukić^{4,5}

1 : DMAS, ONERA
59000, Lille, France
e-mail : julien.berthe@onera.fr

2 : Department of Continuum Mechanics and Structural Analysis
University Carlos III of Madrid
Avenida de la Universidad, 30, 28911 Leganés, Madrid, Spain

3 : INATECH-Sustainable Systems Engineering
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Emmy-Noether Str. 2, 79110 Freiburg, Germany

4 : ESRF – The European Synchrotron
CS40220, 38043 Grenoble Cedex 9, France

5 : Henry Royce Institute
Department of Materials, The University of Manchester, United-Kingdom

Résumé

Dans cette étude, des essais de traction à différentes vitesses de sollicitation sur un stratifié à plis croisés $[0/90_3]_s$ sont réalisés au synchrotron européen de Grenoble (ESRF) sur la ligne ID19. Pour couvrir une large gamme de vitesses de déformation, deux moyens d'essais sont utilisés : l'Universal Testing Machine (UTM), pour les essais jusqu'aux vitesses intermédiaires, et des barres d'Hopkinson en traction pour les plus hautes vitesses. L'installation de ces moyens d'essais sur la ligne ID19 du synchrotron permet la réalisation d'images par contraste de phase aux rayons X à haute cadence. Dans le cadre de cette étude, cela permet le suivi de la fissuration matricielle dans le pli central à 90° du stratifié étudié. De plus, ces résultats sont comparés à ceux obtenus simultanément avec une caméra infrarouge qui observe la tranche de l'éprouvette. Ces essais doivent ainsi permettre la comparaison entre ces deux techniques de mesure jusqu'aux plus hautes vitesses de sollicitation.

Abstract

In this study, tensile tests at different strain rates on a $[0/90_3]_s$ cross-ply laminate are carried out at the European Synchrotron Radiation Facility in Grenoble (ESRF) on the ID19 beamline. To cover a wide range of strain rates, two testing machine are used : the Universal Testing Machine (UTM), for tests up to intermediate strain rates, and Hopkinson tensile bars for higher loading rates. The installation of these testing machines on the synchrotron's ID19 beamline enables phase-contrast X-ray imaging at high speeds. In the context of this study, this enables us to monitor matrix cracking in the 90° central ply of the laminate under investigation. In addition, these results are compared with those obtained simultaneously using an infrared camera to observe the edge of the sample. These tests should make it possible to compare these two measurement techniques up to the highest loading rate.

Mots Clés : Stratifié à plis croisés, Fissuration matricielle, Rayons X, Thermographie infrarouge

Keywords : Cross-ply laminate, Matrix cracking, X-Ray, Infrared Thermography

1. Introduction

La compréhension et la modélisation de l'influence de la vitesse de sollicitation sur le comportement endommageable des matériaux composites constitués de plis unidirectionnels sont des problématiques sur lesquelles actuellement, il demeure complexe de tirer des conclusions définitives, en grande partie en raison du manque de données expérimentales. Les principaux résultats disponibles dans la littérature ont été obtenus avec des essais cyclés incrémentaux réalisés à l'aide de dispositifs d'essais spécifiques permettant l'interruption du chargement sur des vérins hydrauliques rapides [1, 2, 3]. Berton et al.[3] ont récemment mis en évidence des difficultés liées à ces essais cyclés incrémentaux, comme par exemple l'existence de phénomènes de relaxation entre deux cycles qu'il est nécessaire de maîtriser. Ils ont également mis en évidence une difficulté liée à l'utilisation d'une variable d'endommagement macroscopique correspondant à la perte de module de cisaillement au cours des cycles pour l'évaluation de la dépendance à la vitesse des mécanismes d'endommagement. En effet, cette variable ne semble pas présenter d'influence de la vitesse de sollicitation alors que les micrographies locales mettent clairement en évidence une influence de la vitesse de sollicitation sur le développement de l'endommagement dans l'éprouvette. Il paraît donc pertinent d'essayer de s'orienter vers une autre stratification pour l'étude de l'influence de la vitesse sur l'endommagement des matériaux composites. Plus récemment, une méthodologie d'analyse de l'évolution de la densité de fissures sous chargements dynamiques dans des stratifiés à plis croisés a été proposée [4] et appliquée à la caractérisation sous chargements dynamiques de stratifiés à plis croisés avec différentes épaisseurs de plis à 90° à coeur [5]. Comme le montre la Figure 1, une influence de la vitesse a pu être observée avec la diminution de l'épaisseur du pli central à 90° . Enfin, les développements récents effectués au

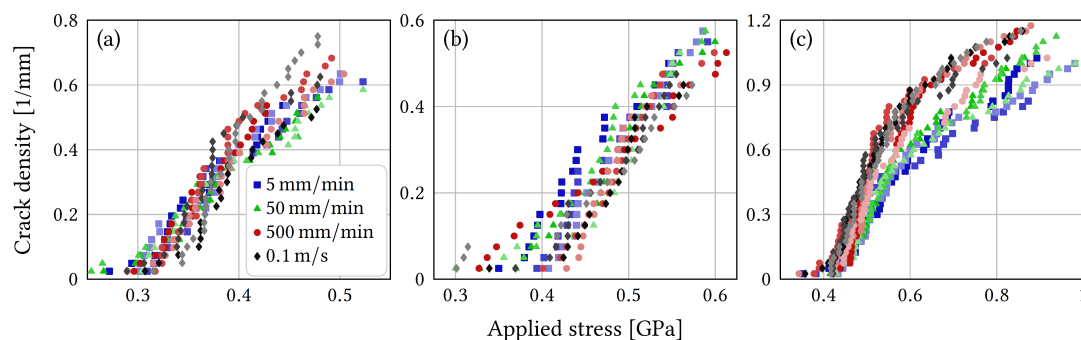


FIG. 1. – Evaluation de la densité de fissures pour les différentes configurations étudiées : (a) $[0/90_3]_s$, (b) $[0/90_2]_s$ and (c) $[0/90]_s$ [5]

synchrotron européen de Grenoble (ESRF) permettent d'envisager l'utilisation de l'imagerie rapide aux rayons X pour l'observation de l'endommagement des composites sous chargements dynamiques [6, 7].

L'objectif des travaux présentés dans ce papier est de comparer les résultats obtenus par ces deux techniques d'imageries pour la caractérisation de l'évolution de la fissuration matricielle dans un stratifié à plis croisés. Différentes vitesses de chargement seront explorées jusqu'à des essais de traction dynamique à hautes vitesses à l'aide d'un dispositif de barres d'Hopkinson en traction. La suite de l'article présentera donc le matériau de l'étude et les différentes machines d'essais disponibles sur ligne ID19 de l'ESRF qui ont permis de réaliser cette campagne d'essais. Les essais aux différentes vitesses seront ensuite analysés et des conclusions sur les limites de la caméra infrarouge utilisée dans cette étude seront détaillées.

2. Matériau de l'étude et montage d'essais

Les différents essais qui seront présentés dans la suite de ce document ont été réalisés sur un stratifié à plis croisés avec la séquence d'empilement suivante : $[0/90_3]_s$. Le matériau constitutif est le

T700GC/M21 qui est constitué de fibres de carbone et d'une résine époxy. Les plaques ont été fabriquées dans un autoclave en respectant le cycle de cuisson fourni par le fabricant. Enfin, les échantillons ont été découpés dans la plaque à l'aide d'une scie diamantée avec les dimensions suivantes : 100 mm x 4.9 mm. L'épaisseur moyenne des éprouvettes est de 2.18 mm pour la stratification choisie dans cette étude.

Les différents essais de cette étude ont été réalisés sur la ligne ID19 du synchrotron européen de Grenoble. Cette ligne permet de par ses spécificités l'obtention d'images à contraste de phase par rayons X avec des cadences d'acquisition élevées allant jusqu'au MHz. Dans ce contexte, il devient envisageable de suivre l'évolution des phénomènes d'endommagement dans un stratifié à plis croisés sous chargements dynamiques. Cette ligne est également équipée de moyens de sollicitation dynamique permettant la caractérisation in-situ. Comme illustré sur la Figure 2, une machine d'essais pour les vitesses intermédiaires, appelée UTM (Universal Testing Machine), permet la réalisation d'essais jusqu'à des vitesses de déformation d'environ 1 s^{-1} . Pour atteindre des vitesses de déformation plus élevées, la ligne est également équipée d'un dispositif de barres d'Hopkinson permettant la réalisation d'essais de traction. Ces deux moyens d'essais, ainsi que le système de fixation des éprouvettes, sont décrits en détails dans l'article de Jakkula et al.[6] et ne seront donc pas rappelés ici par soucis de concision. Les échantillons ont été collés à l'aide d'une colle Loctite 401 à des plaquettes en aluminium

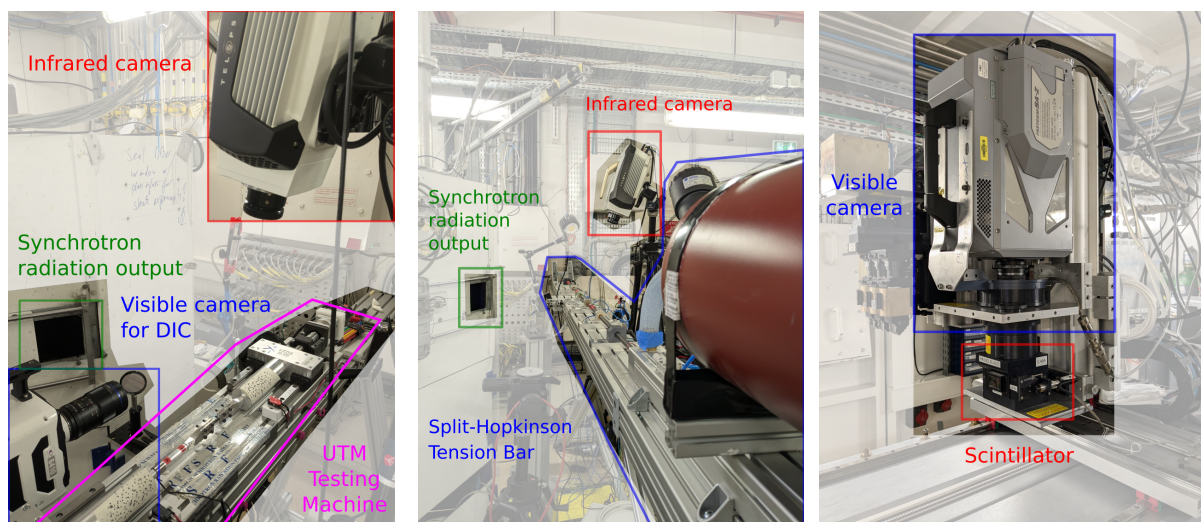


FIG. 2. – Description des montages pour les essais jusqu'aux vitesses intermédiaires, à gauche, pour les essais aux plus hautes vitesses, au milieu, et description du système pour l'acquisition des images aux rayons X dans cette étude, à droite.

permettant le maintien des éprouvettes sur les deux moyens d'essais avec le même système de fixation. Il est important de noter que pour certains essais la ruine finale de l'éprouvette n'a pu être obtenue à cause d'une rupture de la zone de collage entre les plaquettes de liaison et l'éprouvette. Pour chacune des vitesses testées, la configuration des différentes caméras est détaillée dans le Tableau 1. Dans

	Camera Infrarouge	Camera Visible X-Ray	Camera Visible DIC
Essais basse vitesse	1000 Hz	50 Hz	50 Hz
Essais vitesse intermédiaire	20 kHz	20 kHz	20 kHz
Essais haute vitesse	72 kHz	72 kHz	-

TAB. 1. – Synthèse de la configuration des différentes caméras

cette étude, la caméra infrarouge utilisée est une Telops Fast M3k. La caméra visible pour les images aux rayons X est une Photron Fastcam SA-Z. Enfin la caméra visible pour la corrélation d'images

est une Phantom TMX 6410. La corrélation d'images n'a pas été utilisée pour les essais aux barres d'Hopkinson, la déformation de l'échantillon sera obtenue à l'aide du traitement des signaux des barres. Les différentes caméras sont déclenchées de façon synchrone par les systèmes d'acquisition utilisés pour chacune des machines d'essais.

3. Résultats obtenus pour les essais à basse vitesse

Les essais à basse vitesse ont été réalisés pour une vitesse de consigne d'environ 0,04 mm/s conduisant à une vitesse de déformation théorique dans l'éprouvette d'environ $0,002 \text{ s}^{-1}$ (la longueur utile des éprouvettes est d'environ 20 mm). Les images de la Figure 3 ont été obtenues après un post-traitement classique pour ce type d'essais : chacune des images de l'essai est divisée par la médiane d'une série d'images capturées juste après l'essai en l'absence de l'éprouvette. Comme le montre la Figure 3a, il est possible d'observer une texture dans l'image sur toute la zone utile de l'éprouvette. Celle-ci provient du tissu d'arrachage qui a été utilisé pour la fabrication de cette plaque. Les images issues de ces travaux mettent en évidence qu'il est préférable d'éviter l'utilisation d'un tissu d'arrachage pour la fabrication d'éprouvettes destinées à ce type d'essais car la texture vient compliquer l'analyse de l'apparition des fissures. Quoiqu'il en soit, il est néanmoins possible d'observer l'apparition des fissures dans le pli central à 90° de l'éprouvette. Il est également possible d'accroître la détectabilité de

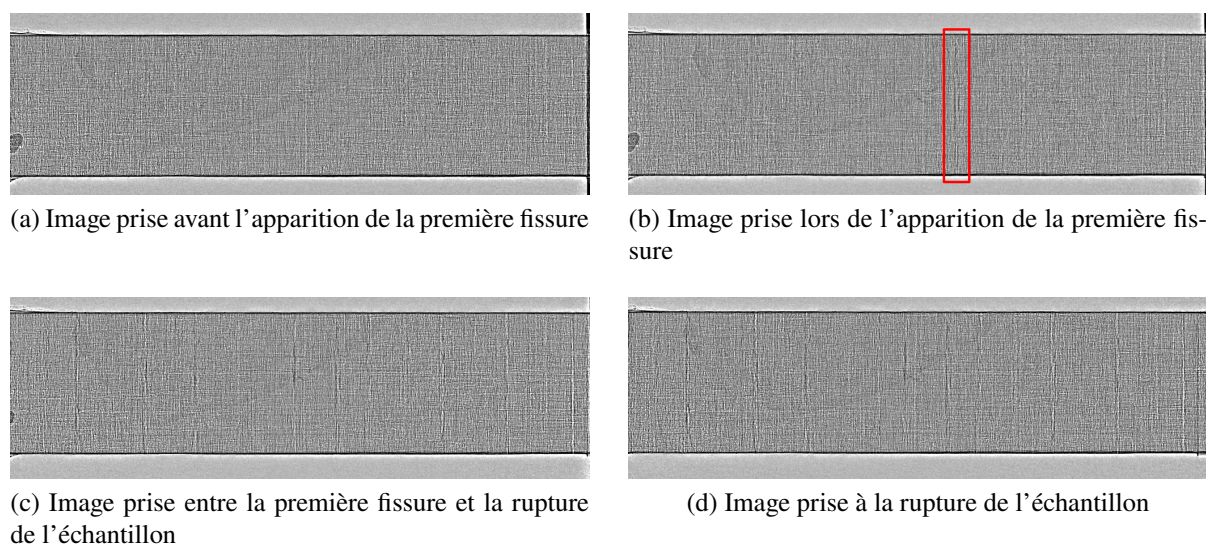


FIG. 3. – Illustration sur quelques images choisies jusqu'à la rupture de l'éprouvette des résultats obtenus avec l'imagerie aux rayons X après post-traitement

l'instant d'apparition d'une fissure en réalisant pour chaque image la différence entre l'image actuelle et la précédente. Une illustration du résultat ainsi obtenu est tracé sur la Figure 4 pour l'image sur laquelle apparaît la première fissure dans le pli central à 90° de l'éprouvette. L'apparition des fissures

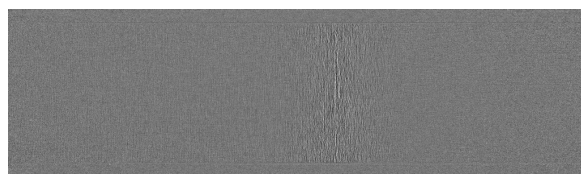


FIG. 4. – Illustration des résultats obtenus avec la technique de post-traitement permettant de mettre en évidence l'instant d'apparition des fissures, application à l'apparition de la première fissure (cf Figure 3b).

dans le pli à 90° est également suivi à l'aide de la thermographie infrarouge comme proposé par Berthe

et Ragonet [4] sur la tranche de l'éprouvette. Tout d'abord, les fissures observées dans les images de la Figure 3 se développent bien sur toute la largeur de l'éprouvette, ce qui valide l'observation réalisée en thermographie infrarouge sur une seule tranche de l'éprouvette. Dans la suite, l'analyse des images infrarouges est réalisée en retranchant à l'image en cours d'analyse une image prise avant le début du chargement. Cette méthode permet de ne focaliser l'analyse que sur la variation de la température au cours de l'essai en s'affranchissant de la température ambiante. Les images ainsi obtenues autour de l'instant d'apparition de la première fissure transverse sont tracées sur la Figure 5. L'image de gauche correspond à l'image juste avant l'apparition de la première fissure dans le pli à 90° . Sur cette image, il est possible d'observer une diminution globale de la température de l'échantillon (variation de température négative pour les pixels $x \in [10; 40]$ et $y \in [7; 11]$) qui est liée à la thermo-élasticité du matériau pour cet essai de traction. Sur l'image de droite, la fissure apparaît clairement pour $x = 28$. Il est possible d'observer que la fissure ne semble pas apparaître sur toute la zone correspondant à l'éprouvette dans l'image en $x = 28$. Ce résultat est logique compte tenu de l'inclinaison entre la caméra infrarouge et la tranche de l'éprouvette qui est observable sur la Figure 2 et qui conduit à imager une partie de la face de l'éprouvette en même temps que la tranche. Les deux techniques de

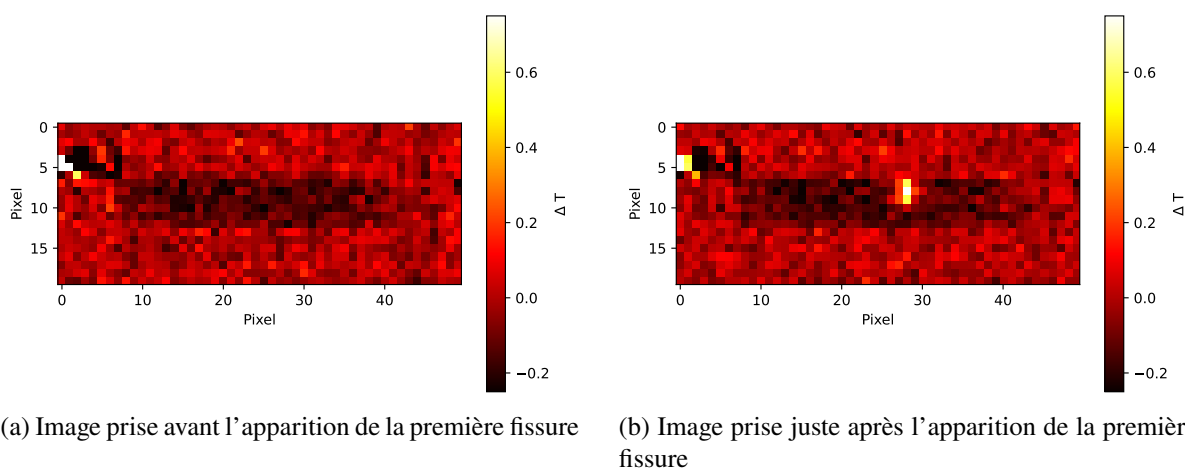


FIG. 5. – Illustration des résultats obtenus avec la caméra infrarouge lors des essais à basse vitesse

mesure conduisent au même résultat pour cet essai avec un nombre de fissures observées au cours de l'essai similaire et des instants d'apparition cohérents.

Cette analyse sera complétée par l'obtention de courbes d'évolution de la densité de fissuration en fonction du chargement appliqué à l'éprouvette pour les différentes éprouvettes testées.

Les résultats pour les plus hautes vitesses sont actuellement en cours d'analyse et seront présentés lors de la conférence.

4. Conclusion

Dans cette étude, des essais de traction à différentes vitesses de sollicitation sur un stratifié à plis croisés $[0/90_3]_s$ ont été réalisés au synchrotron européen de Grenoble (ESRF) sur la ligne ID19. Cela a permis de mettre en place une mesure par contraste de phase aux rayons X à travers l'épaisseur de l'éprouvette combinée à une mesure par thermographie infrarouge sur la tranche de l'éprouvette. Ces deux techniques de mesure permettent ainsi de suivre l'apparition des différentes fissures qui apparaissent dans le pli central à 90° . Pour les essais aux plus basses vitesses, les résultats obtenus sont similaires entre les deux techniques de mesure. L'analyse des essais aux plus hautes vitesses est en cours et permettra une comparaison entre ces deux méthodes jusqu'à des essais dynamiques aux barres d'Hopkinson. L'ensemble de ces résultats sera présenté lors de la conférence.

Remerciements

Nous remercions l'European Synchrotron Radiation Facility pour la mise à disposition de l'installation de rayonnement synchrotron et nous aimerions remercier le personnel de l'ESRF et de l'EMBL Grenoble pour leur assistance et leur soutien dans l'utilisation de la ligne de faisceau ID19. Nous remercions également Matthieu Ragonet pour sa contribution importante à la préparation de cette campagne d'essais.

Références

- [1] J. Fitoussi, F. Meraghni, Z. Jendli, G. Hug, D. Baptiste « Experimental methodology for high strain-rates tensile behaviour analysis of polymer matrix composites », *Composites Science and Technology* Vol. 65 n° 14, pp. 2174–2188, 2005.
- [2] F. Coussa, J. Renard, S. Joannes, J.-C. Teissedre, R. Bompont, N. Feld « A consistent experimental protocol for the strain rate characterization of thermoplastic fabrics », *Strain* Vol. 53 n° 3, pp. e12220, 2017.
- [3] Experimental investigation of the loading rate dependency of the non-linear damageable behaviour of carbon/epoxy laminates, Universitat de Girona. Grup de Recerca en Anàlisi i Materials Avançats per al Disseny Estructural (AMADE), 2023.
- [4] J. Berthe, M. Ragonet « Passive infrared thermography measurement of transverse cracking evolution in cross-ply laminates », *Strain* Vol. 54 n° 6, pp. e12293, 2018.
- [5] F. Coussa, J. Berthe, M. Ragonet « Rate dependency and ply thickness influence on transverse cracking evolution in cross-ply laminates », *Journal of Theoretical, Computational and Applied Mechanics* Vol. , ISSN 2726-6141.
- [6] P. Jakkula, A. Cohen, B. Lukić, D. Levi-Hevroni, A. Rack, G. Ganzenmüller, S. Hiermaier « Split Hopkinson tension bar and universal testing machine for high-speed x-ray imaging of materials under tension », *Instruments* Vol. 6 n° 3, pp. 38, 2022.
- [7] J. M. Rodríguez-Sereno, J. Pernas-Sánchez, J. A. Artero-Guerrero, J. López-Puente, B. Lukić « Experimental study of off-axis compression behaviour in dynamic loading : The open hole effect », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 173, pp. 107653, 2023.