

APPLICATION DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE A L'ETUDE DE LA DIMINUTION DE CONTRAINTE DANS UNE EPROUVETTE D'ALUMINIUM RENFORCEE PAR PATCH COMPOSITE

Marie-Pierre Moutrille, Xavier Balandraud, Michel Grédiac

*Laboratoire de Mécanique et Ingénierie (LaMI)
Université Blaise Pascal, Institut Français de Mécanique Avancée (IFMA)
Campus de Clermont-Ferrand / Les Cézeaux, BP 265
F-63175 Aubière, France
marie-pierre.moutrille@ifma.fr*

Didier Baptiste, Katell Derrien

*Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux LIM, UMR CNRS 8006
ENSAM Paris
75013 Paris, France*

Résumé :

Cet article présente une évaluation expérimentale de la diminution de contrainte dans des éprouvettes d'aluminium renforcées par patchs composites. Lors d'un essai de traction cyclique, l'évolution du champ de températures dans l'épaisseur du substrat est mesurée par thermographie infrarouge. L'amplitude des variations de températures est ensuite déterminée par transformée de Fourier et un lissage est effectué sur la base de fonctions issues d'un modèle unidimensionnel. La diminution des contraintes dans l'aluminium est clairement observée, permettant de mettre en évidence par exemple une dissymétrie entre les deux patchs collés de part et d'autre de l'aluminium. La longueur de transfert d'effort entre substrat et patch est finalement calculée.

Abstract:

This paper presents an experimental assessment of the stress relief in aluminium specimens reinforced by composite patches. During cyclic tensile tests, the evolution of the temperature field is measured through the thickness of the aluminium substrate by using infrared thermography. The field of temperature amplitudes is then calculated by Fourier Transform. A data processing is performed to fit the temperature amplitude field: a suitable function based on a one-dimensional model is used for this purpose. The stress relief in the aluminium is clearly observed, enabling for instance to detect a dissymmetry between the two patches glued on both sides of the specimen. The transfer length is finally calculated.

Mots-clefs :

Renforcement; thermographie infrarouge ; composite.

1 Introduction

On utilise fréquemment des patchs composites pour renforcer ou réparer des structures, et notamment dans l'aéronautique [1]. Les propriétés du joint de colle influencent fortement la qualité du renforcement : longueur de transfert progressif d'effort du substrat vers le patch, concentration de contrainte de cisaillement près du bord libre, etc. Le but de cette étude est d'étudier

expérimentalement le comportement d'une structure renforcée, notamment par des mesures *in situ* dans le joint de colle ou sous le patch composite.

Beaucoup de travaux théoriques ou numériques concernant la réponse mécanique du joint de colle, et plus généralement le transfert de contraintes entre le substrat et le renfort, sont disponibles dans la littérature [2] [3]. Ce transfert de charge entre substrat et renfort induit près du bord libre un pic de cisaillement dans le joint de colle. Dans de précédents travaux [4], des champs de déplacements ont été mesurés dans le joint de colle par corrélation d'images. Ils ont permis d'estimer le cisaillement correspondant.

Le but du travail présenté ici est de compléter ces précédents résultats en mesurant la baisse de contrainte dans l'aluminium sous le patch le long de la zone de transfert. Des mesures de températures par thermographie infrarouge sont réalisées dans ce but.

2 Equation de la chaleur

L'équation de diffusion de la chaleur pour un matériau isotrope produisant des sources de chaleur thermoélastiques s'écrit sous la forme :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \Delta T = -\alpha T \frac{\partial \sigma_{ii}}{\partial t} \quad (1)$$

Avec :

- ρ : densité,
- α : coefficient de dilatation thermique
- C : capacité calorifique
- λ : coefficient de conduction thermique
- T : température
- σ_{ii} : somme des contraintes principales

En supposant des conditions adiabatiques, c'est à dire en pratique une fréquence de chargement suffisamment élevée, le terme de conductivité peut être négligé. On obtient alors l'équation suivante :

$$\Delta T = -\frac{\alpha T}{\rho C} (\Delta \sigma_{ii}) \quad (2)$$

Avec :

- T : température prise égale à la valeur ambiante car les variations sont faibles
- ΔT : amplitude de la variation de température pendant un cycle de chargement
- $\Delta \sigma_{ii}$ est l'amplitude de la somme des contraintes principales durant un cycle de chargement.

L'équation (2) est utilisée pour évaluer le champ de contraintes.

3 Mise en œuvre expérimentale

Les éprouvettes sont découpées dans des plaques d'aluminium 2024-T3 de 4mm d'épaisseur. Sur ces plaques, des bandes de composite unidirectionnel carbone-époxyde ont été collées avec de la colle structurale Redux 312 fournie par Hexcel. Le composite est composé de 3 plis. Il a été collé de part et d'autre des plaques afin d'assurer la symétrie des éprouvettes, évitant ainsi la flexion des éprouvettes lors des essais. Les plaques ont été réalisées par la DGA (Direction Générale de l'Armement - Atelier Industriel Aéronautique de Clermont-Ferrand). Le schéma suivant montre d'une part la géométrie des éprouvettes et d'autre part la zone observée avec la caméra infrarouge :

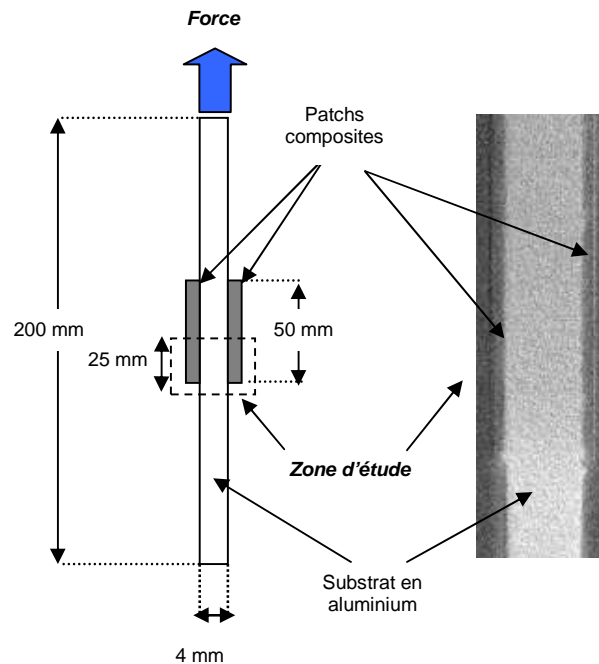


FIG. 1 – Géométrie des éprouvettes et zone d'observation.

Les essais sont réalisés sur une machine de traction MTS (+/-15kN). Le champ de températures est mesuré au cours de l'essai avec une caméra infrarouge CEDIP. La taille de la grille de capteurs est de 320×240 et la résolution de la mesure de 20mK. La fréquence d'acquisition est de 150 Hz. La résolution spatiale est de 100 μm pour les essais réalisés. Deux fréquences de chargement sont utilisées (avec non multiplicité avec la fréquence de chargement mécanique) : 7 et 11Hz. Deux niveaux d'efforts différents sont considérés : des amplitudes de 10 et 14kN avec des efforts moyens respectifs de 5,2 et 7,2 kN.

4 Post-traitement des films thermiques

L'amplitude de la variation de température à chaque pixel est déterminé pour la fréquence de chargement mécanique à l'aide Matlab©, par transformée de Fourier discrète du signal. La figure 2 montre un exemple de champ de variations de la température obtenu pour un essai typique :

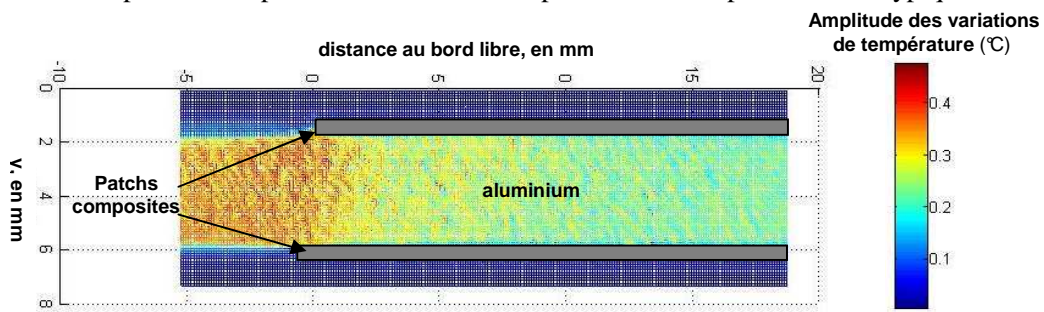


FIG. 2 – Champ d'amplitudes de température durant un cycle de chargement

Ce champ est ensuite lissé ligne par ligne à l'aide d'une fonction similaire à celle d'un modèle unidimensionnel de type « shear lag » [5]:

Si $x < D$

$$f(x) = C \quad (3)$$

Si $x > D$

$$f(x) = C + A \left[\frac{e^{BL_p} - 1}{e^{2BL_p} - 1} (e^{B(x-D)} - e^{-B(x-D)}) + e^{B(x-D)} - 1 \right] \quad (4)$$

Avec :

x la position le long de l'axe x

L_p la longueur du patch.

Et où A , B , C et D sont les paramètres à optimiser avec la méthode des moindres carrés.

On remarque que C et D correspondent respectivement à l'amplitude de la variation de la température dans la zone non patchée (directement reliée à la contrainte nominale de chargement) et à la position du patch composite.

5 Résultats

Les essais ont été menés sur deux éprouvettes différentes : une dont le joint de colle mesure 0,5 mm et l'autre 0,1 mm, à différentes conditions de chargement. La figure 5 montre le champ lissé d'amplitudes de températures pour l'éprouvette dont le joint de colle mesure 0,5 mm.

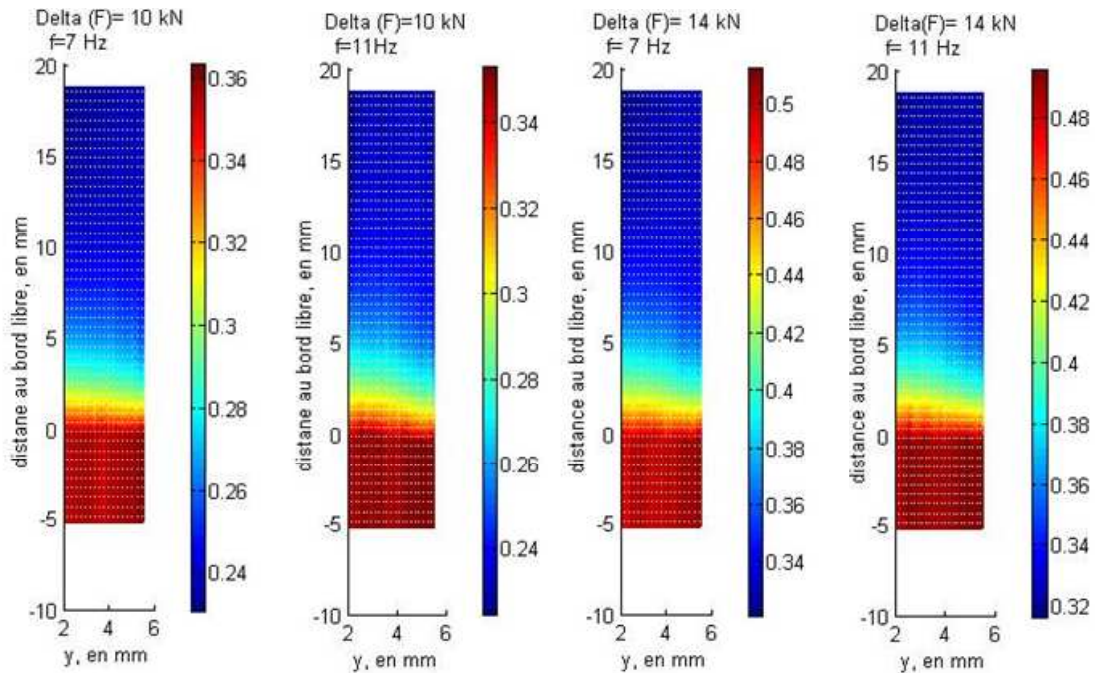


FIG. 3 – Cartographie des amplitudes de températures pour différents cas de charge.

On remarque qu'il existe une dissymétrie dans la distribution du champ d'amplitudes de température. Cette dissymétrie est probablement due à une dissymétrie géométrique : en effet, une observation attentive montre que les patches ne sont pas collés exactement l'un en face de l'autre, et que l'épaisseur de joint de colle peut être sensiblement différente. On retrouve cette dissymétrie sur la valeur de la longueur de transfert à 95% (c'est la longueur nécessaire pour que la contrainte atteigne 95% de sa valeur maximale dans le patch) calculée pour chacun des deux patches de part et d'autres de l'échantillon. Le graphique suivant montre les résultats en terme de longueur de transfert :

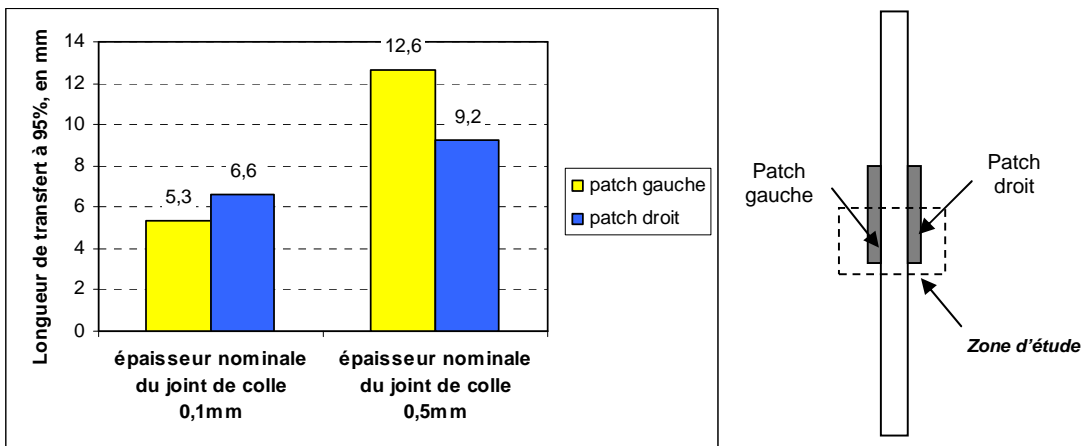


FIG. 4 – Longueurs de transfert à 95%

La diminution de la contrainte dans l'aluminium due à la présence des patches peut être exprimée en pourcentage par rapport à la valeur nominale dans la zone non patchée. La figure suivante montre la diminution de la contrainte dans l'aluminium pour l'éprouvette dont l'épaisseur de joint de colle est 0,5 mm :

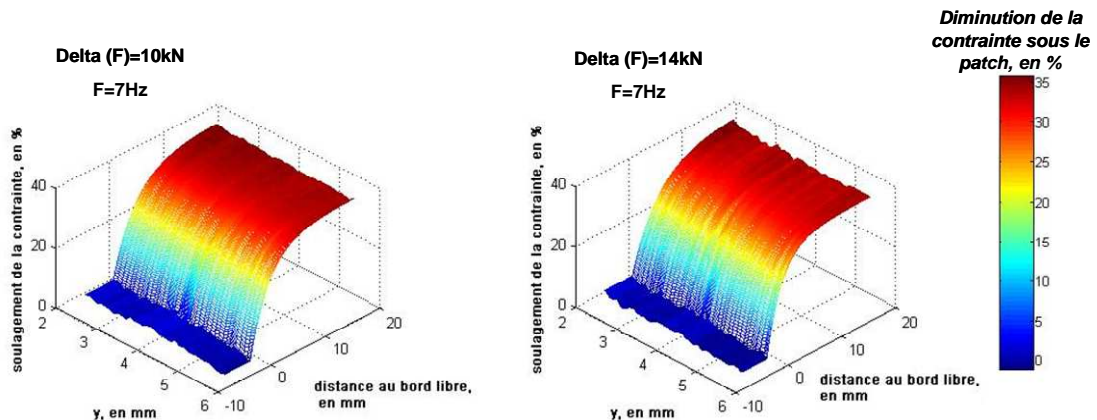


FIG. 5 – Diminution de la contrainte dans l'aluminium.

Quelles que soient les conditions des figures 5, on obtient pour cette éprouvette la même diminution de contrainte. La méthode semble suffisamment répétable pour être considérée comme fiable. Cette diminution représente entre 30 et 35% de la contrainte maximale.

6 Conclusion

L'utilisation de la thermographie infrarouge a permis d'évaluer la diminution de contrainte dans une éprouvette en aluminium renforcée par patches composites, à l'échelle de l'épaisseur du substrat qui vaut quelques millimètres seulement. La longueur de transfert progressive d'effort a pu être mesurée, mettant en évidence une dissymétrie dans le collage des patches composites de chaque côté de l'échantillon.

En choisissant notamment un coefficient de dilatation thermique adapté pour l'aluminium, il sera possible d'estimer la valeur des contraintes dans l'aluminium et en utilisant modèle analytique, on pourra remonter à la valeur du pic de cisaillement dans le joint de colle.

Remerciements

Les auteurs remercient le ministère de la recherche pour le financement de ce projet (ACI ECD 058) ainsi que la DGA (Direction Générale de l'Armement - Atelier Industriel Aéronautique de Clermont-Ferrand) pour la fourniture en éprouvettes.

Références

- [1] Baker, A.A., Bonded composite repair of fatigue-cracked primary aircraft structure, *Composite structure*, vol. 47, pp 431-443, 1999
- [2] Tsai M.Y., Morton J., An evaluation of analytical and numerical solutions to the single-lap joint, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 31, pp 2537-2563, 1994
- [3] Tsai M.Y., Oplinger D. W., Morton J., Improved theoretical solutions for adhesive lap joints, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 35, no. 12, pp 1163-1185, 1998
- [4] Moutrille M-P., Derrien K., Baptiste D., Grédiac M., Balandraud X., Through thickness strain field measurement in an adhesive joint between composite and aluminium, *12th European Conference on Composite Materials*, Biarritz, France, 2006
- [5] Adams R., Wake W., *Structural adhesive joints in engineering*, Elsevier, 1984.