

Détection et caractérisation par thermographie infrarouge du délaminage par fatigue des composites

H. Sawadogo

Ecole des Mines de Douai, Département Technologie des Polymères et Composites & Ingénierie Mécanique,
941, rue Charles Bourseul, B.P. 10838- 59508 Douai Cedex, sawadogo@ensm-douai.fr,

S. Panier

Ecole des Mines de Douai, Département Technologie des Polymères et Composites & Ingénierie Mécanique,
941, rue Charles Bourseul, B.P. 10838- 59508 Douai Cedex, panier@ensm-douai.fr,

S. Hariri

Ecole des Mines de Douai, Département Technologie des Polymères et Composites & Ingénierie Mécanique,
941, rue Charles Bourseul, B.P. 10838- 59508 Douai Cedex, hariri@ensm-douai.fr

Résumé

Ce travail porte sur l'utilisation de la thermographie infrarouge afin d'évaluer les sources de chaleur dans le cas d'endommagement de matériaux composites. A l'aide d'une méthode inverse, les sources de chaleur sont déterminées à partir de la température de surface. Cette méthode est appliquée à des éprouvettes en matériaux composites pré-endommagés. La capacité de détection du délaminage par thermographie infrarouge est comparée avec une méthode ultrasonore C-Scan. Les résultats montrent que les concentrations de contraintes sont détectées par la détermination du couplage thermoélastique et la nocivité du délaminage par la mesure de la dissipation intrinsèque.

Mots clés : Fatigue des composites, thermographie infrarouge, délaminage, ondes ultrasonores, c-scan

Abstract

This paper presents the use of infrared thermography to assess sources of heat in the event of damage to composite materials. Using an inverse method, sources of heat are determined from the surface temperature. This method is applied to composite pre-damaged specimens. The ability to detect delamination by infrared thermography is compared with ultrasonic C-scan method. The results show that stress concentrations are detected by the thermoelastic coupling source and harmfulness of the delamination by the dissipative source.

Keywords: Fatigue, infrared thermography, delamination, ultrasonics waves, c-scan.

1. INTRODUCTION

La détection du délaminage dans les matériaux composites peut être réalisée à l'aide de différentes méthodes comme l'émission acoustique, des méthodes ultrasonores ou encore radiographiques. Depuis le progrès des détecteurs infrarouges, de nombreuses techniques d'évaluations du délaminage sont basées sur la thermographie infrarouge. Classiquement, elles sont classées en deux catégories passives ou actives suivant le type d'excitations. Les méthodes passives regroupent les méthodes où la pièce étudiée n'est pas sollicitée mécaniquement. L'excitation peut être thermique (méthode des flashes [1]) ou ultrasonore (vibrothermographie [2]). Dans le premier cas, on mesure le retard (la phase) de l'onde thermique lorsqu'elle rencontre un défaut et dans le second cas, on mesure l'élévation de température générée par le frottement des surfaces en contact au niveau d'un défaut par le passage de l'onde

élastique (seuls les défauts plans sont détectables). Les méthodes actives quant à elles sont basées sur la mesure de température lors d'une sollicitation mécanique.

En effet, si on mesure la température en surface, avec un thermocouple ou une caméra infrarouge, d'une éprouvette soumise à une sollicitation cyclique (appelé essai d'auto-échauffement), on remarque une élévation de la température moyenne ainsi qu'une oscillation de celle-ci autour de la valeur moyenne. Cette évolution de la température est due à des sources de chaleur qui sont la dissipation intrinsèque et les différents couplages thermomécaniques. La dissipation intrinsèque est associée à des transformations structurales irréversibles et conduit à une augmentation progressive de la température. Cette élévation globale de la température a été ainsi utilisée par Luong comme indicateur d'endommagement par fatigue pour certains matériaux métalliques [3]. Toubal et al. ont également montré pour des matériaux composites à fibres de carbone le lien entre l'élévation de température et l'endommagement par fatigue [4].

La variation de température due au couplage thermoélastique est utilisée depuis de nombreuses années afin d'évaluer le niveau des contraintes dans une structure sous chargements cycliques, grâce à la relation de Lord Kelvin qui relie linéairement la variation de température à la trace du tenseur des contraintes. La méthode dite TSA (Thermoelastic Stress Analysis) est basée sur ce principe et est couramment utilisée pour l'analyse des contraintes. Ainsi, dès 1975, Charles et al. ont montré qu'il était possible avec cette méthode de détecter les concentrations de contraintes issues du délaminage [5].

D'autres auteurs comme Steinberger [6] utilisent conjointement les sollicitations mécaniques et la thermographie passive pour détecter des défauts dans des composites à fibres de carbone.

Au lieu de travailler sur la température (conséquence), on a décidé de plutôt déterminer les sources de chaleur (causes) dans l'esprit des travaux menés au sein de l'équipe thermomécanique des matériaux du Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC) de l'université de Montpellier [7]. Les sources de chaleur sont évaluées à l'aide d'une méthode inverse à partir des champs de température mesurées en surface des éprouvettes. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes en verre/époxy pré-endommagées pour tester la pertinence de la méthode. Après l'essai, une technique de détection par ultrasons appelé C-scan est utilisé pour contrôler le niveau exact du délaminage dans l'éprouvette.

2. ESTIMATION DES SOURCES DE CHALEUR

En se plaçant dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles et sous certaines hypothèses valables dans le cas d'un essai de fatigue sur un matériau homogène thermiquement, Chrysochoos et al. propose une équation de la chaleur 2D qui s'écrit sous la forme [7]:

$$\rho C \left(\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial t} + \frac{\tilde{\theta}}{\tau_{th}^{2D}} - \frac{k}{\rho C} \left(\frac{\partial^2 \tilde{\theta}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{\theta}}{\partial y^2} \right) \right) = \tilde{d}_1 + \tilde{s}_{the} \quad (1)$$

Où $\tilde{\theta}$, \tilde{d}_1 et \tilde{s}_{the} sont respectivement la variation de température, la dissipation intrinsèque et la source

de couplage thermoélastique moyennées suivant l'épaisseur de l'éprouvette et $\tau_{th}^{2D} = \frac{\rho C e}{2h}$ la constante

de temps représentative des fuites thermiques par convection et rayonnement selon les faces avant et arrière de l'éprouvette (e épaisseur de l'éprouvette et h coefficient d'échange thermique).

A partir d'autres simplifications comme, l'hypothèse d'une température uniforme dans la largeur puis l'hypothèse d'une température uniforme dans le sens de la longueur, on aboutit respectivement à des modèles 1D et 0D.

Pour déterminer les sources de chaleur, il faut résoudre le problème inverse (1), $\tilde{\theta}$ étant une donnée du problème (température mesurée) et \tilde{d}_1 et \tilde{s}_{the} étant les inconnues. Pour cela, on va s'appuyer sur les propriétés de la source thermoélastique. Kelvin a montré que le terme de couplage thermoélastique pouvait s'exprimer par $s_{the} = -T\alpha_{th} \cdot tr(\overline{\sigma})$. Par conséquent, dans le cas d'essais cycliques, elle se limite à un signal sinusoïdal de même fréquence f_s que la sollicitation.

L'équation aux dérivées partielles (1) et les conditions aux limites étant linéaires, on peut étudier séparément l'influence de chaque type de source de chaleur sur le champ de température.

Pour obtenir l'amplitude des sources thermoélastiques, il suffit d'extraire de la température mesurée la partie sinusoïdale de fréquence f_s et de l'introduire dans l'équation (1).

Pour la dissipation intrinsèque, on suppose que l'endommagement est suffisamment lent sur un petit nombre de cycles pour être caractérisé par une dissipation moyenne par cycle $\overset{\circ}{d}_1$ constante. Comme l'énergie thermoélastique s'annule à la fin de chaque cycle $\oint s_{the} \cdot dt = 0$, il suffit d'intégrer l'équation (1) sur N cycles afin d'estimer une dissipation moyenne par cycle (N=50 pour cette étude) :

$$\overset{\circ}{d}_1 = \frac{1}{N} \oint_N \tilde{d}_1 \cdot dt$$

La température mesurée par thermographie infrarouge est caractérisée par un niveau de bruit très important. Il est donc nécessaire de filtrer le signal brut. En se basant des constatations précédentes et de la même manière que Boulanger [8], on choisit une fonction locale d'approximation de la température composée d'une partie sinusoïdale, traduisant la partie périodique des effets thermoélastiques, et d'une dérive linéaire temporelle qui prend en compte les effets dissipatifs et autres phénomènes instationnaires.

$$\theta_{app}(x, y, t) = \underbrace{A(x, y) \cdot t + B(x, y)}_{\text{dérive linéaire}} + \underbrace{C(x, y) \cdot \sin(2\pi f_s t) + D(x, y) \cdot \cos(2\pi f_s t)}_{\text{partie périodique}}$$

Les différents paramètres sont déterminés par lissage de la température mesurée. Un premier lissage temporel est réalisé pour chaque pixel par la méthode des moindres carrés. A cause de la présence du laplacien dans l'équation (1), il est nécessaire de lisser spatialement le signal lissé préalablement. On a opté pour une moyenne mobile effectuée simultanément dans les deux directions de l'espace sur P pixels (ici P=21), le pixel traité se trouvant au centre de la fenêtre. D'autres types de lissage peuvent être utilisés. Ainsi, Berthel et al. utilisent une approximation polynomiale pour A, B, C et D et réalisent un lissage spatial et temporel simultanément [9]. D'autres auteurs projettent le champ de température mesurée sur la base de Fourier spatiale [7].

3. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'endommagement des composites s'initiant généralement en profondeur, deux caméras infrarouges (une Jade III et une Titanium de la société Cedip/Flir) ont été utilisées pour filmer les deux faces des

épreuves. Ceci permet de vérifier si l'endommagement est détectable sur les deux faces c'est-à-dire si la mesure de la température en surface est bien représentative de la température interne.

Pour être sûr de la localisation de l'initiation de l'endommagement, il a été décidé de fabriquer des éprouvettes pré-endommagées artificiellement. Deux types d'éprouvettes ont été utilisés (figure 1). Elles sont constituées de 5 plis UD fibres de verre / époxy. Pour le premier type d'éprouvette, tous les plis sont dans la même direction et pour le second type, l'empilement est le suivant 0/90/0/90/0. Le pré-endommagement a été réalisé en coupant le pli central avant fabrication. Ce défaut situé au milieu de l'empilement permettra de vérifier l'aptitude de la thermographie infrarouge à détecter cet endommagement. L'éprouvette UD sera utilisée dans ce sens. La deuxième éprouvette à plis croisés devrait quant à elle se délaminer sous l'action d'une sollicitation cyclique. La conductivité thermique a été évaluée à l'aide d'un schéma de Mori-Tanaka à partir des conductivités thermiques des fibres et de la résines (données fournisseur) et les fractions volumiques. Le terme de fuite a été évalué en enregistrant l'évolution de la température d'une éprouvette chauffée dans une étuve à 65°C et se refroidissant à l'air libre. Le retour à l'équilibre de la température moyenne est approché par une fonction exponentielle fonction du temps et du terme de fuite. Le terme de fuite est calculé à l'aide de la méthode des moindres carrés.

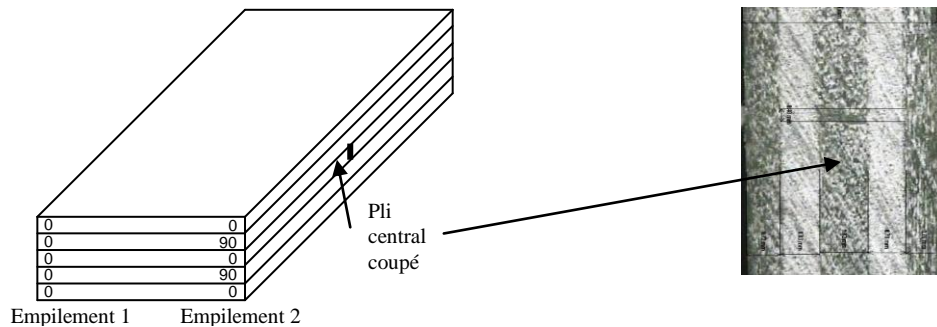


Figure 1 : Epreuves pré-endommagées

Les essais cycliques ont été réalisés sur une machine de fatigue classique. Afin d'éviter tous rayonnements parasites, les mors et les montants de la machine ont été couverts de papier et la machine d'essais ainsi que les deux caméras ont été isolées à l'aide d'un tissu épais (figure 2).



Figure 2 : Montage expérimentale de thermographie infrarouge

Le chargement appliqué est de type traction avec un rapport de charge de $R=0,1$ à une fréquence de 3 Hz. Les éprouvettes sont testées à chargement croissant, le niveau de chargement est défini en pourcentage de la limite à la rupture des éprouvettes non pré-endommagées.

Pour chaque caméra, un étalonnage pixel par pixel a été réalisé avec un temps d'intégration optimal (1500 μm pour les deux caméras) pour couvrir une gamme de température allant de 15°C à 45°C (un point d'étalonnage par degré) et avoir la plus grande dynamique de mesure à l'aide d'un corps noir étendu. La fréquence d'acquisition de la caméra est fixée 19 Hz. L'émissivité de la surface a été évaluée à 0,7 à l'aide de mesures par thermocouples couplées à celles obtenues par thermographie infrarouge sur des éprouvettes chauffées précédemment dans une étuve.

4. ESTIMATION DES SOURCES DE CHALEUR

Un film de 100 images avant chaque essai sur l'éprouvette au repos est enregistré pour déterminer la température initiale. La moyenne sur ces 100 images est retirée aux températures mesurées pendant l'essai. Les mesures de dissipation d_1 moyenne par cycle ont été réalisées sur 50 cycles.

Les résultats affichés ne sont pas les sources de chaleur mais les sources de chaleur divisées par ρC ce qui permet d'exprimer ces sources en °C/s (vitesse d'échauffement). Les mesures de la température sur la face 1 et 2 ont été réalisées respectivement avec la caméra Titanium et la caméra Jade III.

La Figure 3 montre l'intérêt de déterminer les sources de chaleur par rapport à la mesure de la moyenne des températures sur 50 cycles. L'éprouvette testée est de type UD avec une contrainte maximale appliquée de 30% du R_m . On remarque que la visualisation de la source thermoélastique donne une information beaucoup plus précise sur la localisation de l'endommagement. Des mesures simultanées sur les deux faces de l'éprouvette montrent que l'endommagement est détectable à partir des deux faces ce qui justifie l'hypothèse que la température en surface est représentative de la température interne.

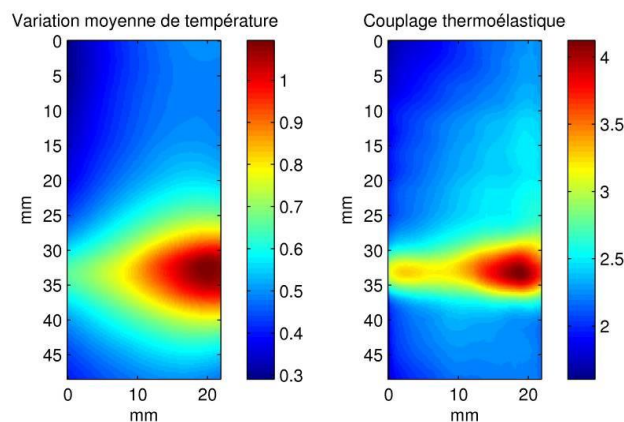


Figure 3 : Variation de température moyenne (°C) et terme de couplage thermoélastique (°C/s) sur la face 1 pour une éprouvette UD à 30% du R_m

La planche suivante présente la distribution du couplage thermoélastique et de la dissipation pour trois niveaux de chargement (20%, 30% et 40%) appliqués à une éprouvette UD. L'enregistrement à 40% a été réalisé quelques cycles avant la rupture finale de l'éprouvette. On peut remarquer que pour le chargement appliqué faible 20%, la dissipation est quasiment nulle par contre le couplage thermoélastique permet de localiser la concentration de contrainte autour du défaut. Lorsque le

chargement appliqué augmente, la dissipation n'est plus négligeable et sa distribution est proche de celle du couplage thermoélastique.

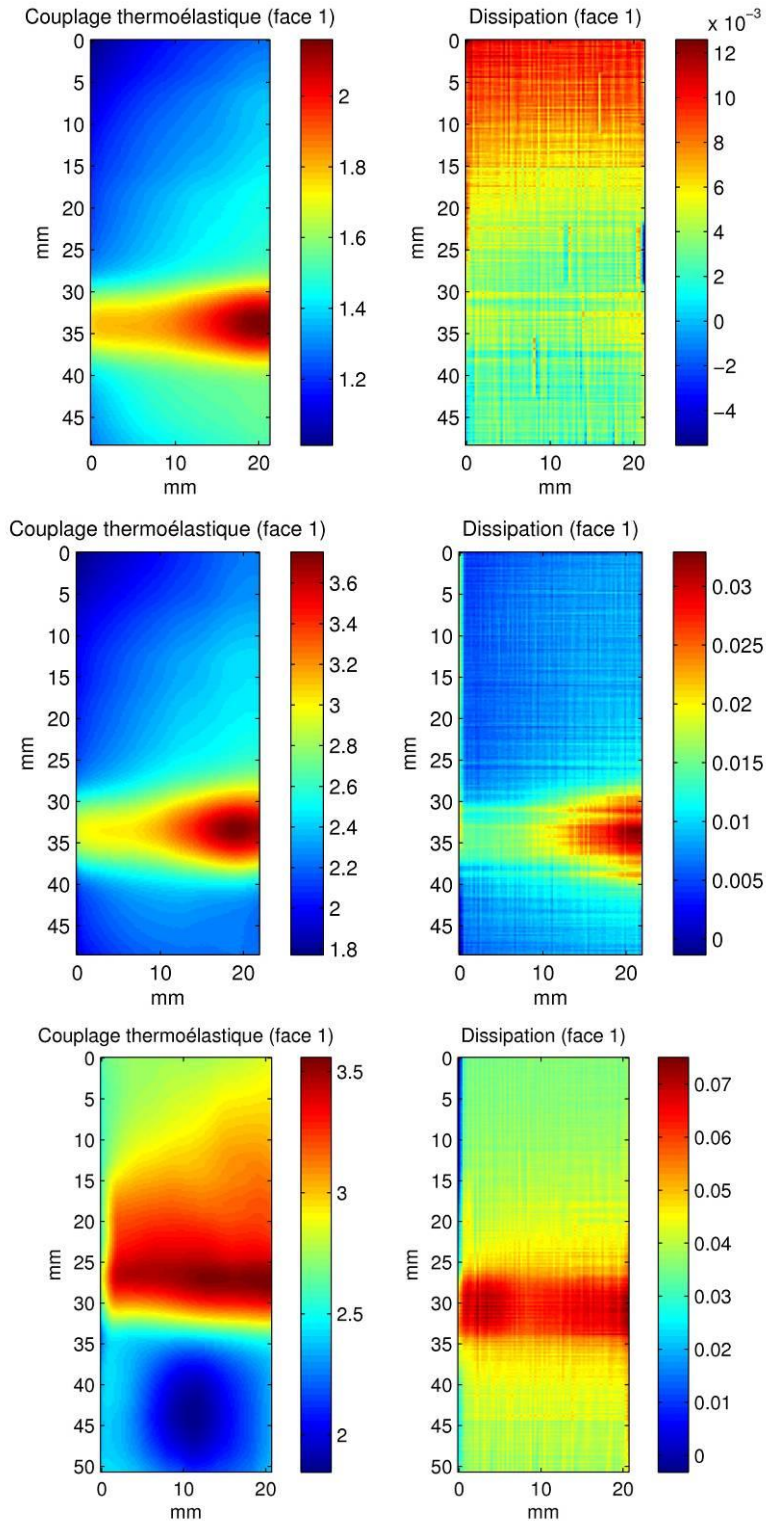


Figure 4 : Couplage thermoélastique et dissipation pour 3 niveaux de chargement différents (20%, 30% et 40%)

Ces résultats montrent bien que la dissipation nous donne une information sur la nocivité du défaut. A 20% de R_m , le défaut initial ne se propage pas donc il n'a pas de dissipation.

Pour vérifier la capacité de détection de la méthode, on décide de comparer les résultats obtenus par thermographie avec ceux obtenus par C-Scan. Le système de C-Scan appelé 'UT win' fabriqué par la société 'Physical Acoustics Corporation' est utilisé pour scanner les éprouvettes à l'aide d'un transducteur de 5 Mhz. Les résultats du C-scan sont présentés sous deux formes : en amplitude ou en temps de parcours. Dans le premier cas, la variation de l'amplitude de l'onde reçue est analysée par rapport à l'onde envoyée et dans le second cas, c'est la variation de la durée du trajet qui est analysée. Les figures 5 et 6 montrent les résultats du C-Scan d'une éprouvette UD respectivement en amplitude et en temps de vol. La zone de délaminage est nettement définie dans les deux types de post-traitements.

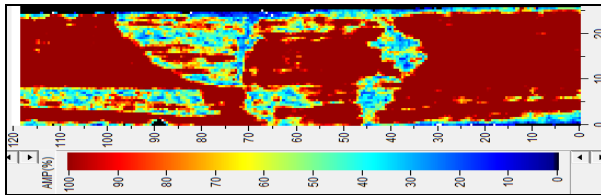


Figure 5 : C-scan de l'éprouvette à pli coupé en amplitude

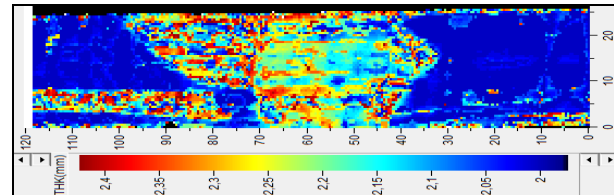


Figure 6 : C-scan de l'éprouvette à pli coupé en temps de vol

Les résultats obtenus par thermographie juste avant la fin de l'essai sont donnés sur la figure suivante. Le terme de dissipation permet de délimiter la zone de délaminage. Par contre, le terme de couplage thermoélastique indique uniquement les concentrations de contraintes et non la localisation exacte du délaminage.

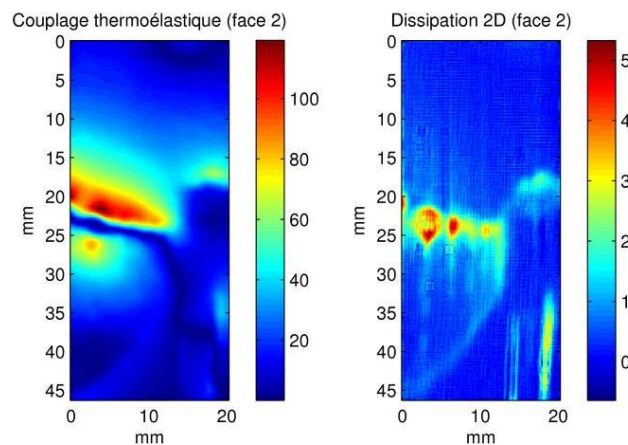


Figure 7 : Terme de couplage thermoélastique et dissipation intrinsèque

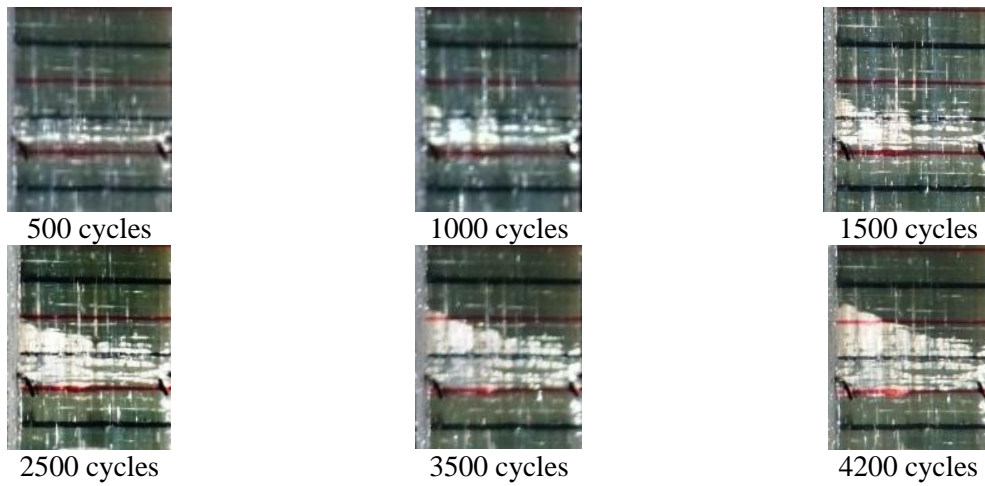


Figure 8 : Photos d'une éprouvette à plis croisés sous un chargement de 40%

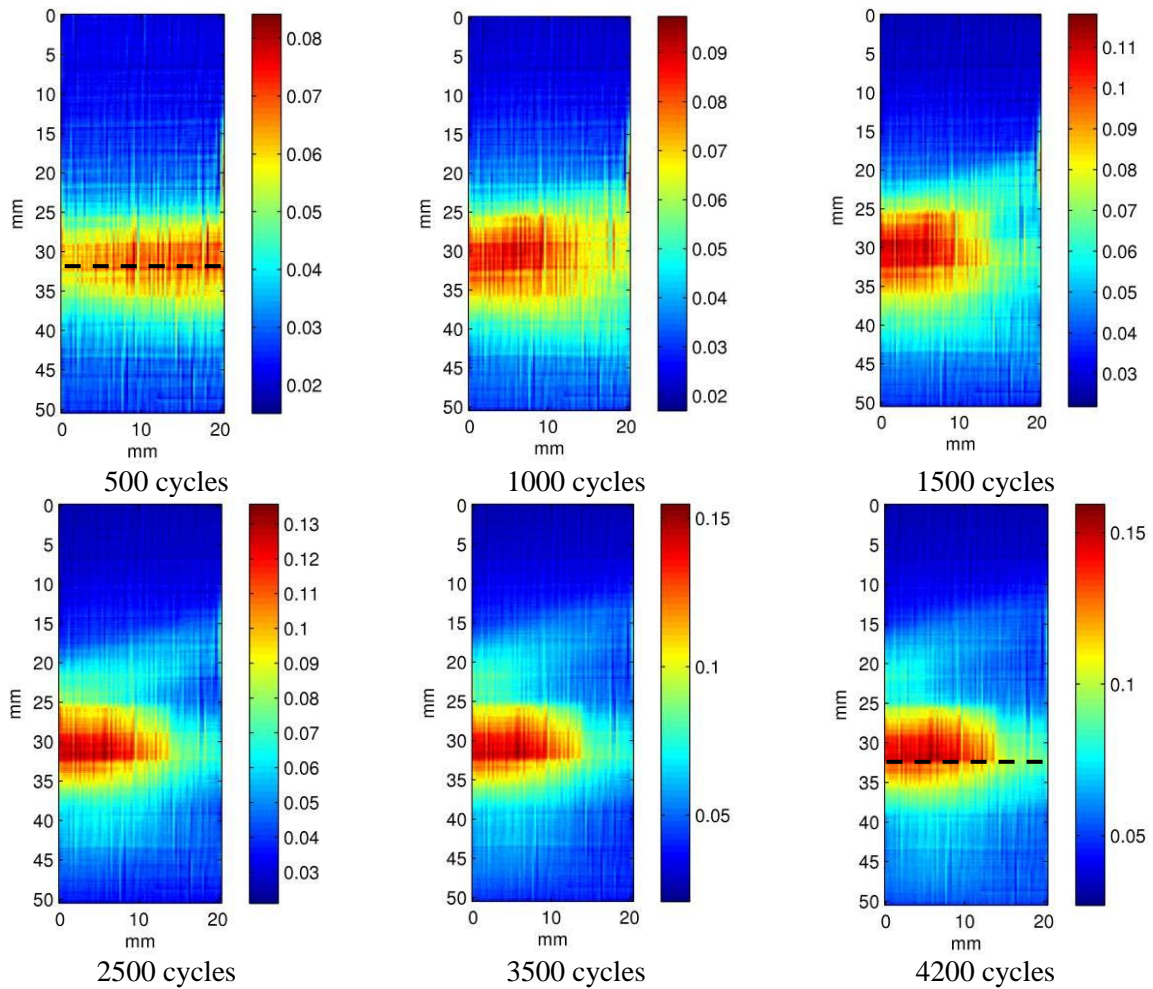


Figure 9 : Evolution de l'énergie dissipée au cours d'un essai de fatigue

De part leur empilement, les éprouvettes UD ne peuvent se délaminer à partir du défaut initial. Par contre, les éprouvettes à plis croisés s'endommagent par délaminage à partir du défaut initialement créé. L'utilisation d'éprouvettes en verre/époxy permet de visualiser à l'œil nu le délaminage. Une séquence de photos prises au cours d'un essai de 4200 cycles sur une éprouvette à plis croisés sous un niveau de chargement de 40% est donnée sur la

Figure 8. Après 1000 cycles, le délaminage commence à se propager vers le haut. Le front du délaminage n'est pas perpendiculaire à la fibre neutre de l'éprouvette mais légèrement incliné. L'énergie dissipée a été déterminée aux mêmes instants que la prise des photos (

Figure 9). Le maximum de dissipation se trouve toujours au bord du défaut initial (tracé en pointillé). On remarque tout de même une augmentation de la dissipation au cours de l'essai en valeur maximale. Au cours de l'essai, la dissipation maximale se déplace vers la gauche, zone où le délaminage s'initie et se propage.

5. CONCLUSION

La méthode inverse utilisée pour évaluer les sources de chaleur semble prometteuse même pour les matériaux composites. Le terme de couplage thermoélastique a permis de localiser les concentrations de contraintes. Ceci n'est pas nouveau car équivalent à la méthode TSA. Par contre, l'énergie dissipée au bord d'un défaut et en cours de délaminage a pu aussi être déterminée. La dissipation peut avoir trois origines différentes : la viscoélasticité du matériau, l'énergie dissipée par plastification ou l'énergie dissipée par création de surface dans le cas du délaminage.

Cette donnée nous donne une information sur la cinématique de propagation du délaminage. Avant de passer à une phase d'identification de cette énergie dissipée, il est nécessaire de vérifier deux hypothèses fortes sur lesquelles repose la modélisation qui sont l'hypothèse que la température de surface est représentative de la température interne et l'isotropie thermique du matériau.

6. REFERENCE

1. Meola C., Carlomagno G. M., Squillace A., Vitiello A., Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography, *Engineering Failure Analysis*, 13, 380-388, 2006.
2. Rantala J., Wu D., Busse G., NDT of polymer materials using lock-in thermography with water-coupled ultrasonic excitation, *NDT & E International*, 31, 43-49, 1998.
3. Luong M.P., Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique, *Mechanics of Materials*, 28, 155-163, 1998.
4. Toubal L., Karama M., Lorrain B., Damage evolution and infrared thermography in woven composite laminates under fatigue loading, *International Journal of Fatigue*, 28, 1867-1872, 2006.
5. Charles J., Appl F.J., Francis J.E., Using the scanning infrared camera in experimental fatigue studies, *Experimental Mechanics*, 15, 133-138, 1975.
6. Steinberger R., Valadas Leitao T.I., Ladstätter E., Pinter G., Billinger W., Lang R.W., Infrared thermographic techniques for non-destructive damage characterization of carbon fibre reinforced polymers during tensile fatigue testing, *International Journal of Fatigue*, 28, 1340-1347, 2006.
7. Chrysochoos A., Louche H., An infrared image processing to analyse the calorific effects accompanying strain localisation, *Int. J. of Eng. Sci.*, 38, 1759-1788, 2000.
8. Boulanger T., Chrysochoos A., Mabru C., Galtier A., Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steels, *Int. J. of Fatigue*, 26, 221-229, 2004.
9. Berthel B., Wattrisse B., Chrysochoos A., Galtier A., Thermographic Analysis of Fatigue Dissipation Properties of Steel Sheets, *Strain*, 43, 273-279, 2007.