



**HAL**  
open science

# Mesure par thermographie infra-rouge du taux de restitution d'énergie critique d'interfaces de composites stratifiés UD et tissés

Christophe Bouvet, Kathy Prévautel, Julien Mathieu, Bruno Imbert,  
Stéphanie Jaminion

► **To cite this version:**

Christophe Bouvet, Kathy Prévautel, Julien Mathieu, Bruno Imbert, Stéphanie Jaminion. Mesure par thermographie infra-rouge du taux de restitution d'énergie critique d'interfaces de composites stratifiés UD et tissés. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01623245

**HAL Id: hal-01623245**

**<https://hal.science/hal-01623245>**

Submitted on 25 Oct 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Mesure par thermographie infra-rouge du taux de restitution d'énergie critique d'interfaces de composites stratifiés UD et tissés

## *Measure of critical energy release rate of UD and woven laminated composite interface using infrared thermography*

C. Bouvet<sup>1</sup>, K. Prévautel<sup>1,2</sup>, J. Mathieu<sup>3</sup>, B. Imbert<sup>2</sup>, S. Jaminion<sup>3</sup>

1 : Université de Toulouse, ISAE-Supaéro, Institut Clément Ader  
10 Avenue Edouard Belin, BP 54032, 31055 Toulouse cedex 4, FRANCE  
e-mail : [christophe.bouvet@isae.fr](mailto:christophe.bouvet@isae.fr)

2 : Toulouse Tech Transfert  
118 route de Narbonne, CS 24246, 31432 Toulouse cedex 4, FRANCE  
e-mail : [imberty@toulouse-tech-transfer.com](mailto:imberty@toulouse-tech-transfer.com)

3 : HOLO3  
7 rue du général Cassagnou, 68300 Saint-Louis, FRANCE  
e-mail : [s.jaminion@holo3.com](mailto:s.jaminion@holo3.com)

### Résumé

Des essais classiques DCB (Double Cantilever Beam) et ENF (Ended Notched Flexure) de mesure du taux de restitution d'énergie critique d'interfaces de composites stratifiés UD et tissés ont été menés afin de tester la capacité d'une méthode de mesure par thermographie infra-rouge pour évaluer ces caractéristiques. La technique de thermographie infra-rouge permet en effet d'évaluer facilement l'énergie dissipée en chaleur lors de la propagation d'une fissure et de remonter au taux de restitution d'énergie critique via le coefficient de Taylor Quinney. Cette technique présente l'avantage de permettre des mesures locales de l'énergie dissipée et permet donc de dissocier les différents modes d'endommagement présents dans une structure. Néanmoins, cette technique est encore peu utilisée et nécessite d'être validée sur des cas classiques, tels que les essais DCB et ENF utilisés afin de mesurer le taux de restitution d'énergie critique d'interfaces de composites stratifiés.

Un logiciel, EFTIRT (Evaluation of Fracture Toughness using InfraRed Toughness), a été développé afin de permettre une utilisation simple des mesures de thermographie infrarouge et de remonter au taux de restitution d'énergie critique lors de la propagation d'une fissure. Ce logiciel a en particulier été testé lors d'essais DCB et ENF sur un stratifié tissé verre/époxy et permet de trouver des valeurs en bon accord avec les dépouillements classiques. Il permet en particulier de déterminer le refroidissement présent en pointe de fissure dû au couplage thermoélastique et la chaleur dissipée par sa propagation. Un avantage important de ce type de mesure est de permettre une mesure du taux de restitution d'énergie même lors d'une propagation rapide et instable de la fissure, contrairement aux méthodes classiques.

### Abstract

Standard DCB (Double Cantilever Beam) and ENF (Ended Notched Flexure) tests, used to measure the critical energy release rate of UD and woven laminate composite interfaces, were performed in order to test the capability of a measurement method by infrared thermography to evaluate these characteristics. The technique of infrared thermography makes it possible to easily evaluate the energy dissipated in heat during the crack growth and to determine the critical energy release rate via the Taylor Quinney coefficient. This technique has the advantage of enabling local measurements of the energy dissipated and thus makes it possible to dissociate the different modes of damage developing in the structure. Nevertheless, this technique is still little used and needs to be validated on standard cases, such as the DCB and ENF tests used to measure the critical energy release rate of interfaces of laminated composites.

A software, EFTIRT (Evaluation of Fracture Toughness using InfraRed Toughness), has been developed to allow a simple use of infrared thermography measurements and to evaluate the critical energy release rate during the crack growth. In particular, this software has been tested with DCB and ENF tests on a glass/epoxy woven laminate and allows to find values in good agreement with the standard analyzes. It makes it possible in particular to determine the cooling present as a crack tip due to the thermoelastic coupling and the heat dissipated by its propagation. An important advantage of this type of measurement is that it allows to measure the critical energy release rate even during a rapid and unstable crack growth, contrary to the conventional methods.

**Mots Clés :** Mécanique de la rupture, thermographie infrarouge, propagation de fissure

**Keywords :** Fracture mechanics, infrared thermography, crack growth

## 1. Introduction

Un logiciel, EFTIRT (Evaluation of Fracture Toughness using InfraRed Toughness), a été développé afin de permettre une utilisation simple des mesures de thermographie infrarouge et de remonter au taux de restitution d'énergie critique lors de la propagation d'une fissure. Ce logiciel a en particulier été testé lors d'essais DCB et ENF sur un stratifié tissé verre/époxy et permet de trouver des valeurs en bon accord avec les dépouillements classiques de type « méthode des complaisances ». Il permet en particulier de déterminer le refroidissement présent en pointe de fissure (dû au couplage thermoélastique) et la chaleur créée par sa propagation. Un avantage important de ce type de mesure est de permettre une mesure du taux de restitution d'énergie même lors d'une propagation rapide et instable de la fissure, contrairement aux méthodes classiques qui peuvent poser problème dans ces configurations. Les valeurs de  $G_{Ic}$  et  $G_{IIc}$  déterminées sur différents essais (DCB et ENF) et différents matériaux (UD carbone/époxy, tissu verre/époxy, UD carbone/PEEK) sont en bon accord avec les valeurs des fabricants et de la littérature.

Cette technique de mesure du taux de restitution d'énergie par l'intermédiaire de la thermographie infrarouge étant relativement récente [1-6], des corrélations avec les techniques de mesure classiques sont nécessaires afin de démontrer sa pertinence. L'objet de cette étude est donc de mener des essais classiques DCB et ENF afin de comparer les résultats trouvés avec la méthode classique de la compliance et par mesure IR. Dans le cadre de cet article, seul un composite tissé verre/époxy sera présenté.

## 2. Matériau étudié

Le matériau étudié est un composite verre/époxy tissé M21/45%/120 fourni par la société Hexcel Composites. Le drapage consiste en 34 plis à  $0^\circ$  de 0.109 mm d'épaisseur séparés au centre par un film de téflon afin d'initier la fissure. Ses propriétés élastiques et thermiques nécessaires pour dépouiller les essais DCB et ENF sont données table 1 ; où  $E_{II}$  est le module d'Young dans la direction longitudinale,  $k_{II}$  la conduction thermique selon la direction longitudinale,  $k_{ZZ}$  la conduction thermique selon la direction hors plan,  $C$  la capacité calorifique et  $\rho$  la masse volumique.

	$E_{II}$ (GPa)	$k_{II}$ (W/m/K)	$k_{ZZ}$ (W/m/K)	$C$ (J/kg/K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Verre tissé / Epoxy M21/45%/120	25	0.55	0.35	880	1770

Tableau 1 : Propriétés du stratifié Verre tissé/Epoxy M21/45%/120

## 3. Essais DCB

L'essai DCB classiquement utilisé présente l'inconvénient d'induire un déplacement de la partie de l'éprouvette non encore fissurée. Ce mouvement induit donc un déplacement de la process zone, c'est-à-dire de la zone endommagée en pointe de fissure, qui peut perturber la mesure IR. Afin de remédier à ce déplacement, l'essai DCB a été adapté et l'effort est imposé par l'intermédiaire d'un cône monté sur le mors mobile de la machine de traction et 2 rouleaux sont fixés sur les 2 bras de l'éprouvette afin de limiter au maximum les dissipations par frottement (Fig. 1a).

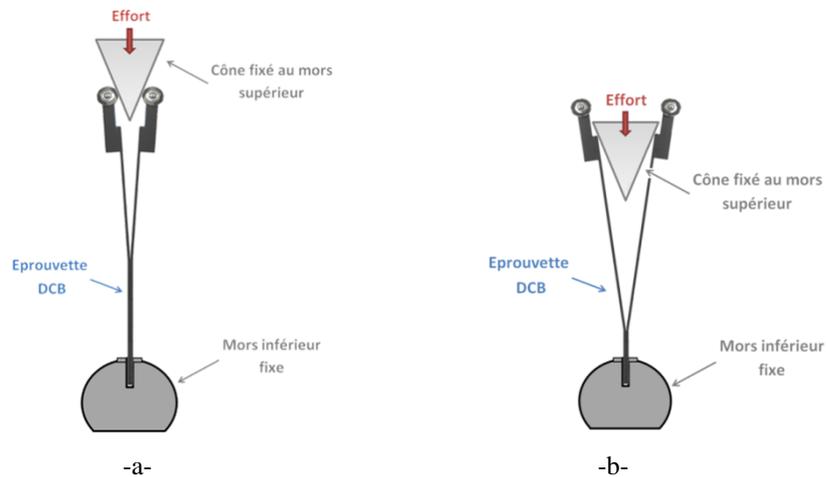


Figure 1 : principe de l'essai DCB modifié avec (a) cône en appui sur les galets de l'éprouvette DCB et (b) cône en appui sur l'éprouvette DCB

Dans le cas présent, la taille du cône choisie et la raideur relativement faible de l'éprouvette ont induit un contact entre ce cône et l'éprouvette (Fig. 1b). Ce contact est clairement visible sur la courbe effort/déplacement de l'essai (zones III et IV, Fig. 2). A partir de ce point, les techniques classiques de détermination du taux de restitution d'énergie posent problème car une partie de l'énergie est dissipée par frottement, et les dépouillements suivants ne concerneront donc que la zone II siège de la propagation de la fissure (Fig. 2). On peut néanmoins remarquer que ces frottements ne posent aucun problème à la technique par IR, car elle permet d'évaluer l'énergie dissipée seulement par la propagation de la fissure ; même si cette démarche ne sera pas présentée ici.

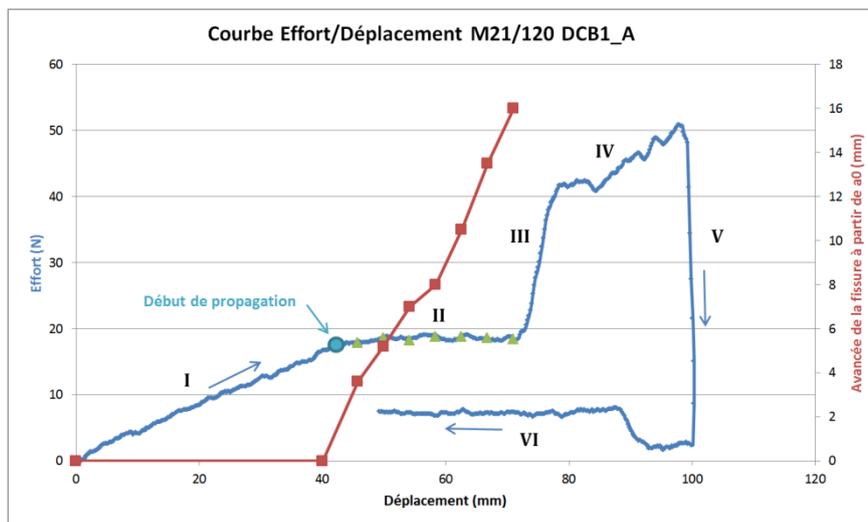


Figure 2 : Courbe Effort/Déplacement pour l'essai DCB1\_A M21/120

Dans cette zone II de propagation de la fissure, une méthode de dépouillement des aires simplifiées et une méthode de la complaisance ont été appliquées. Les 2 méthodes donnent des résultats très similaires : la méthode des aires simplifiées fournit une valeur moyenne de  $0.94 \text{ kJ/m}^2$  et la méthode de la complaisance une valeur moyenne de  $0.88 \text{ kJ/m}^2$ .

Lors de l'essai, un suivi par caméra IR a également été effectué. La figure 3 représente 8 images prises par caméra IR lors de la propagation de la fissure avec un intervalle d'une seconde entre 2 images consécutives (le numéro en bas de chaque image correspond au numéro de l'image, sachant que la fréquence d'acquisition du film était de 50 Hz, d'où les 50 images pour 1 s). On voit nettement la propagation de la fissure avec une zone de refroidissement visible en point de fissure due au couplage thermoélastique du matériau [3-8] (l'échelle des températures est visible figure 4a).

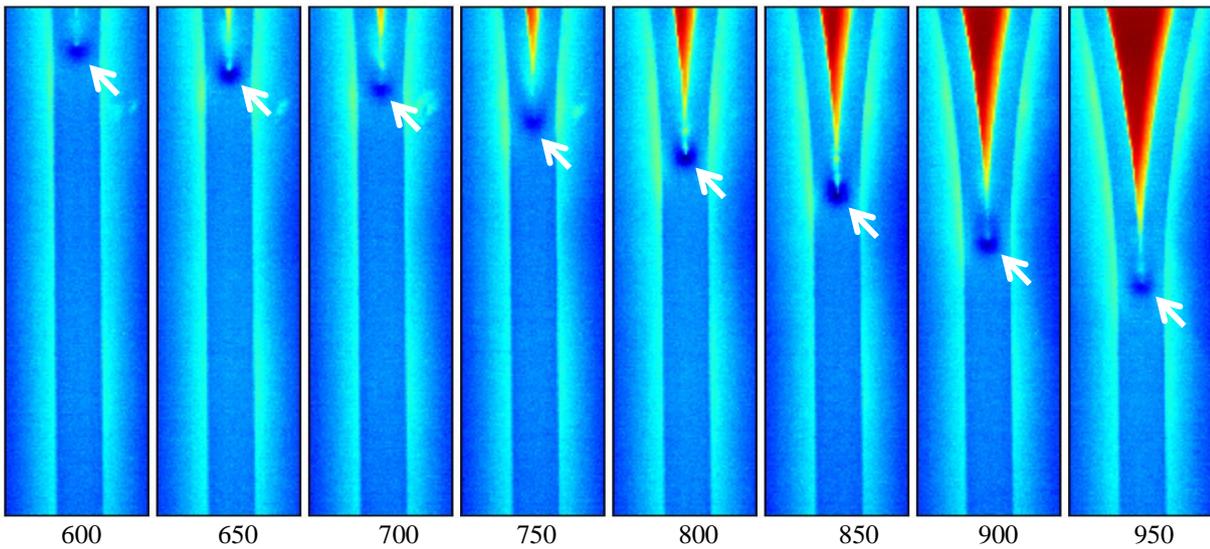


Figure 3 : Avancée de la fissure pour l'essai DCB1\_A M21/120

Afin d'étudier le passage de la fissure, 6 lignes ont été tracées le long du parcours de la fissure (Fig. 4) ; ce sont ces lignes qui permettront d'évaluer le taux de restitution d'énergie critique. L'équation de la chaleur permettra en effet de déterminer l'énergie dissipée, puis l'intégrale de l'énergie dissipée sur la ligne étudiée permettra de remonter au  $G_c$  via le coefficient de Taylor Quinney [9-10], permet de déterminer le taux de restitution d'énergie critique [1-6]. Le coefficient de Taylor Quinney est évidemment un paramètre fondamental pour utiliser la technique IR et représente donc l'inconvénient majeur de cette méthode. Lors de cette étude, nous avons choisi d'utiliser une valeur de 0.9 ; autrement dit, nous avons considéré que 90% de l'énergie dissipée par le matériau était dissipée en chaleur. Dans la réalité ce coefficient semble compris entre 0.9 et 1 pour les matériaux composites classiques [1-6, 9-11], mais sa valeur reste difficile à trouver dans la littérature et peut varier selon les conditions d'essai. On notera que l'objectif de ces essais était autant de vérifier la validité de la mesure de  $G_c$  par IR que d'évaluer le coefficient de Taylor Quinney !

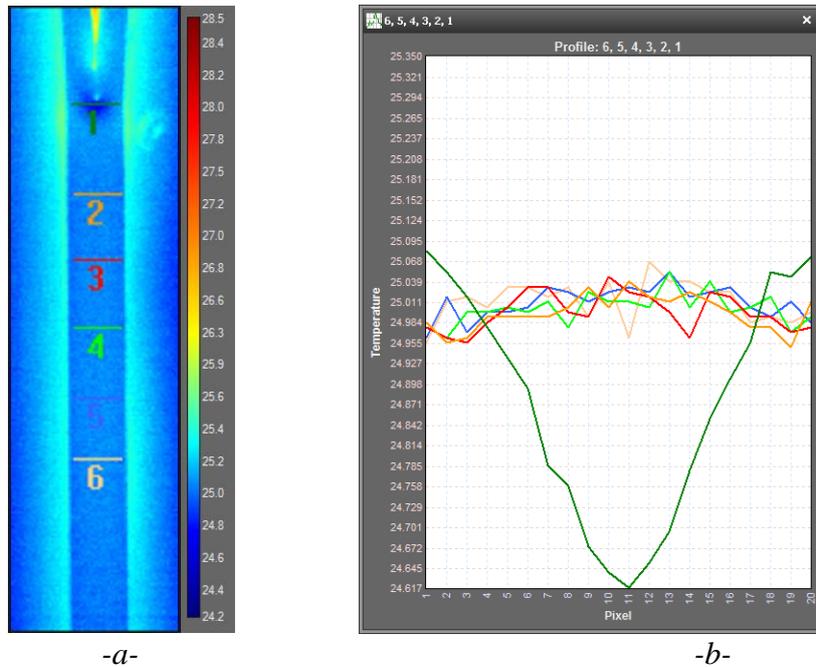


Figure 4: (a) Zones de calcul du taux de restitution d'énergie et (b) champ de température des différentes lignes

Sur la figure 4, on constate un refroidissement thermoélastique d'environ  $0.4^{\circ}\text{C}$  en pointe de fissure (selon les lignes considérée, cette baisse de température varie entre  $0.35$  et  $0.5^{\circ}\text{C}$ , mais cela dépend évidemment de la vitesse de chargement choisie). Lors du passage de la fissure, on observe une augmentation de la température d'environ  $0.4^{\circ}\text{C}$  par rapport à la température moyenne (ligne rouge, Fig. 5), soit d'environ  $0.8^{\circ}\text{C}$  par rapport au refroidissement précédemment observé.

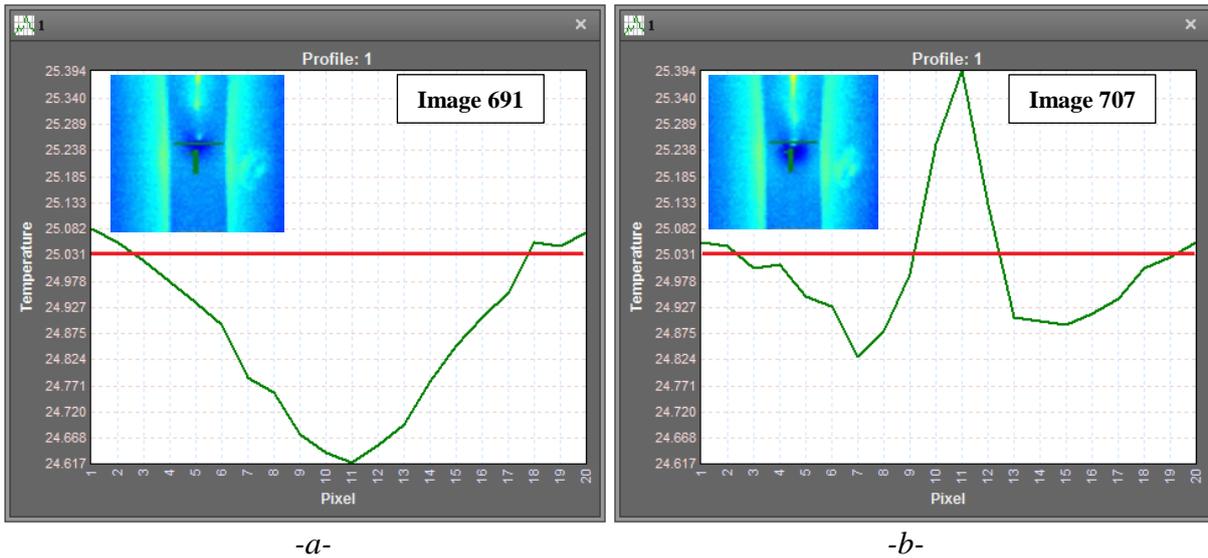


Figure 5 : Variation de la température (a) avant le passage de la fissure et (b) pendant le passage de la fissure

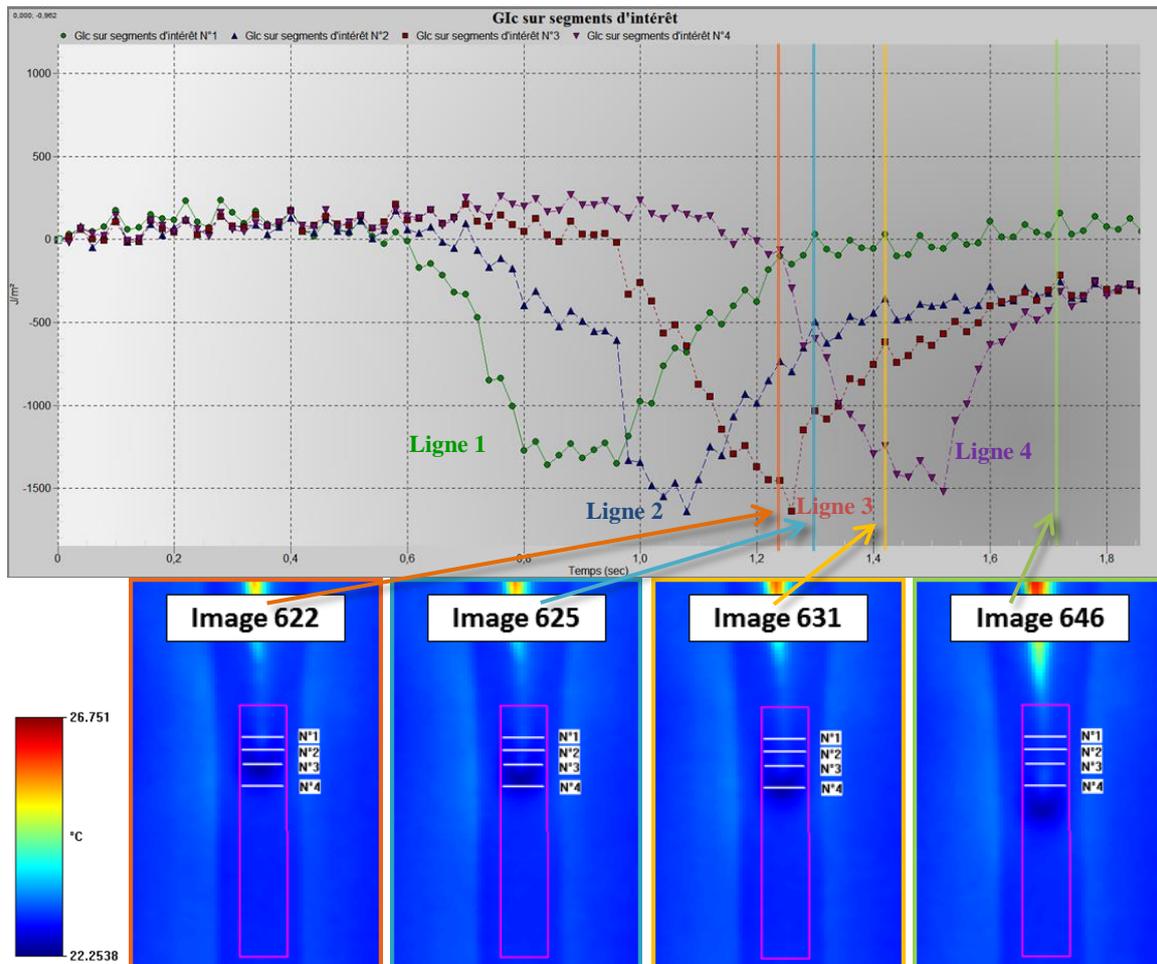


Figure 6 : Cartographie de  $G_{Ic}$  en fonction du temps sur les segments d'intérêt 1, 2, 3 et 4 pour l'essai DCB1\_A M21/120

L'évolution de l'énergie « créée » sur 4 lignes tracées le long du passage de la fissure est tracée figure 6. L'énergie est évidemment négative avant le passage de la fissure et augmente au passage de la fissure. Dans le cas présent, l'énergie dissipée par le passage de la fissure est inférieure (ou quasiment égale) à l'énergie thermoélastique. On notera au passage que l'énergie thermoélastique n'est évidemment pas une énergie dissipée, mais est restituée lorsque les contraintes sont relâchées. Néanmoins si l'on considère que le taux de restitution d'énergie critique intègre cette énergie,  $G_c$  sera donc égal à la remontée de l'énergie entre son minimum et sa valeur après le passage de la fissure (Fig.6), ce qui donne ici une valeur moyenne (pour l'ensemble des essais réalisés et des segments choisis) de  $1.2 \text{ kJ/m}^2$ .

La valeur trouvée est donc 30% supérieure à la valeur déterminée par les méthodes classiques. La prise en compte de l'énergie de couplage thermoélastique dans le calcul de  $G_c$  doit expliquer en partie cette différence. Le coefficient de Taylor Quinney peut également expliquer une partie de cette différence ; une valeur de 1 au lieu de 0.9 aurait en effet diminué la valeur de  $G_c$  de 10%.

#### 4. Essais ENF

Des essais ENF ont ensuite été menés avec le même stratifié (Fig. 7). Les courbes obtenues sur 4 éprouvettes sont tracées figure 8.

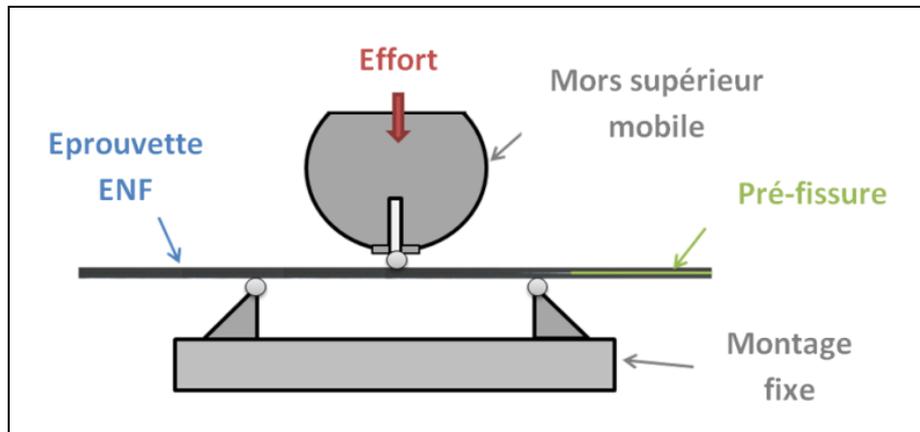


Figure 7 : principe de l'essai ENF

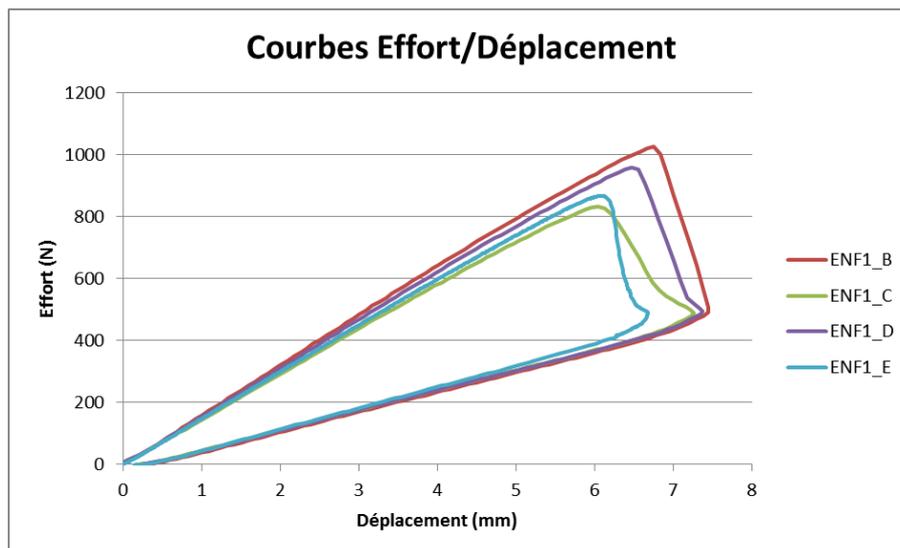


Figure 8 : Courbes Effort/Déplacement pour 4 essais ENF sur M21/120

L'initiation de la fissure est observée pour des efforts compris entre 800 et 1000 N. La fissure se propage ensuite de façon brutale. La courbe de l'essai ENF1\_C est détaillée figure 9, avec en particulier l'évolution de la longueur de fissure.

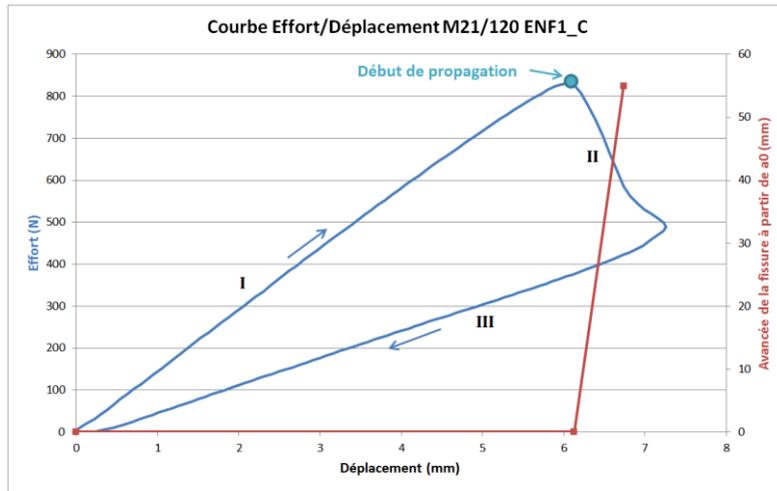


Figure 9 : Courbe Effort/Déplacement pour l'essai ENF1\_C M21/120

Au vu de la propagation instable de la fissure, seule la méthode des aires a été appliquée à ce cas. On trouve alors une valeur moyenne de  $G_{IIc}$  de  $4.6 \text{ kJ/m}^2$  pour l'ensemble des cas (une dizaine de propagations différentes sur 3 éprouvettes différentes). Cette valeur est évidemment un majorant du taux de restitution d'énergie critique au vu de la propagation instable de la fissure [12-14].

Comme pour les essais DCB, un suivi par caméra IR a été effectué (Fig. 10). Le temps entre chaque image de la figure 10 est d'environ 0.25 s (fréquence d'acquisition de la caméra IR de 200 Hz) et l'échauffement relevé au passage de la fissure est d'environ  $2^\circ\text{C}$ . Evidemment, plus la propagation est rapide et plus l'échauffement obtenu est important (en considérant que l'énergie créée est indépendante de la vitesse de propagation).

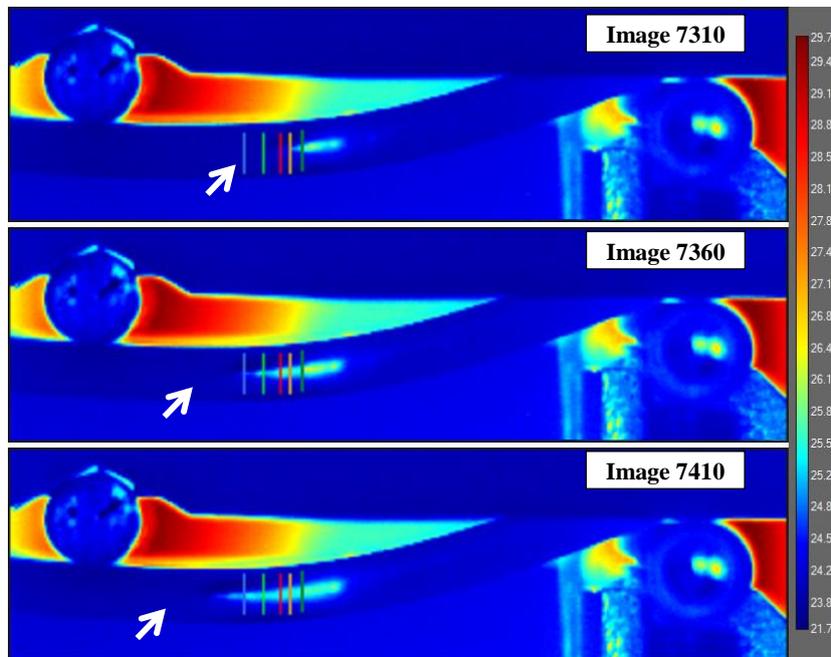


Figure 10 : Avancée de la fissure pour l'essai ENF1\_C M21/120

Cinq lignes ont ensuite été tracées sur le passage de la fissure afin d'observer l'échauffement engendré par la propagation (Fig. 11). On constate un échauffement d'environ  $2^\circ\text{C}$  au passage de la fissure et un refroidissement thermoélastique faible, comparativement à l'essai DCB.

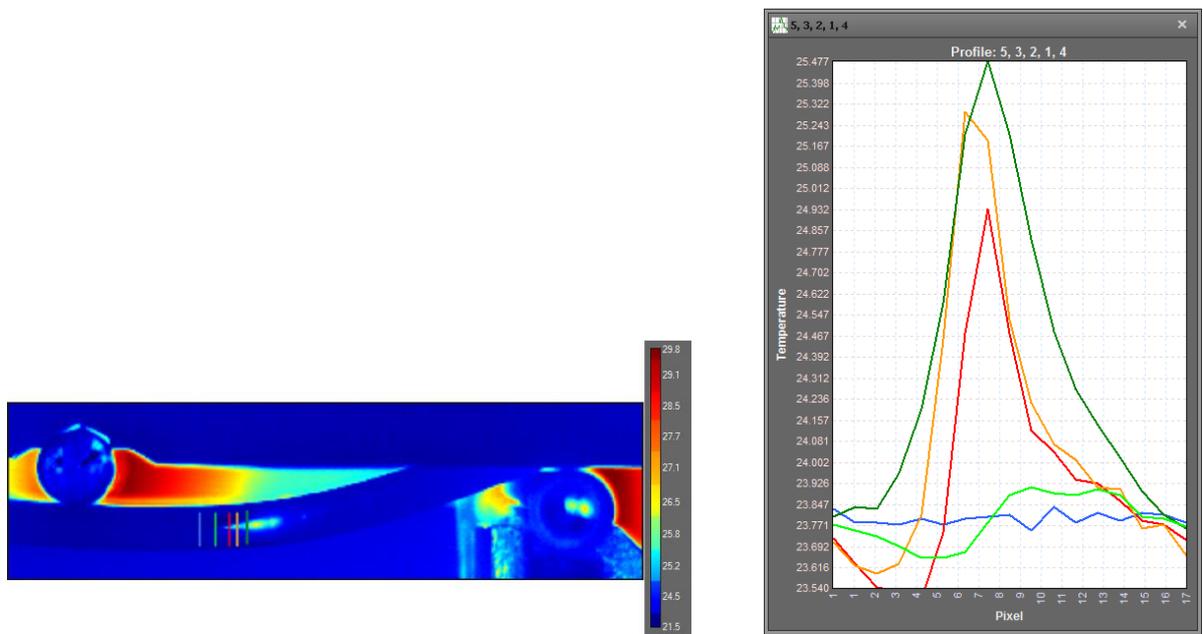


Figure 11 : Tracé du champ de température sur 5 lignes situées le long du trajet de la fissure

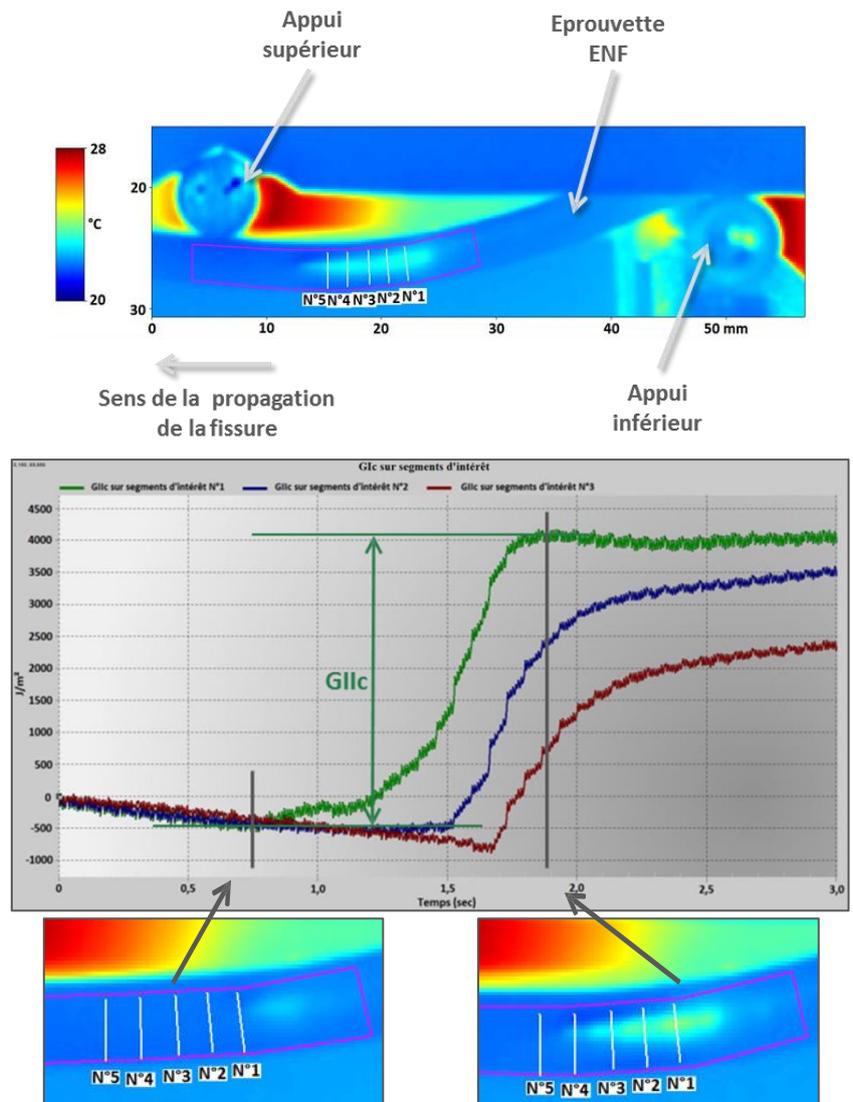


Figure 12 : Cartographie de  $G_{IIc}$  en fonction du temps sur les segments d'intérêt 1, 2 et 3 pour l'essai ENF1\_C M21/120

L'évolution de l'énergie « créée » lors du passage de la fissure sur 3 lignes situées sur son trajet est ensuite tracée figure 12. L'énergie du refroidissement thermoélastique est inférieure au cas des essais DCB et est en particulier très inférieure à l'énergie dissipée par la fissure lors de sa propagation. Comme pour le cas des essais DCB, si l'on considère que le taux de restitution d'énergie critique intègre l'énergie du refroidissement thermoélastique,  $G_c$  sera donc égal à la remontée de l'énergie entre son minimum et sa valeur après le passage de la fissure (Fig. 12), ce qui donne ici une valeur moyenne (pour l'ensemble des essais réalisés et des segments choisis) de  $4.0 \text{ kJ/m}^2$ .

La valeur trouvée par thermographie IR est donc inférieure d'environ 15% au calcul effectué par la méthode des aires. Il est néanmoins difficile de conclure, car la propagation de la fissure étant instable, la méthode des aires est un majorant du taux de restitution d'énergie critique (une partie de l'énergie est libérée sous forme d'énergie cinétique lors de la propagation instable de la fissure dans la structure, puis dissipée).

## 5. Conclusion

Un logiciel, EFTIRT (Evaluation of Fracture Toughness using InfraRed Toughness), a été développé afin de permettre une utilisation simple des mesures de thermographie infrarouge et de remonter au taux de restitution d'énergie critique lors de la propagation d'une fissure. Ce logiciel a en particulier été testé lors d'essais DCB et ENF sur un stratifié tissé verre/époxy. Les valeurs trouvées par thermographie IR sont en bon accord avec les dépouillements classiques de type « méthode des complaisances » ou « méthode des aires ».

Ces mesures IR permettent en particulier de mettre en évidence le refroidissement présent en pointe de fissure dû au couplage thermoélastique et la chaleur créée par la propagation de la fissure. Ce refroidissement thermoélastique doit être pris en compte dans le calcul de  $G_{IC}$  dans le cas de l'essai DCB, alors que son effet est faible sur le calcul de  $G_{IIC}$  lors de l'essai ENF.

Un avantage d'une mesure de  $G_c$  par thermographie IR est de permettre une mesure du taux de restitution d'énergie critique même lors d'une propagation rapide et instable de la fissure, contrairement aux méthodes classiques.

Enfin la mesure par thermographie IR permet également de suivre simplement la longueur de coupure.

## Références

- [1] Lisle T., Bouvet C., Pastor M.L., Rouault T., Margueres P. "Damage of woven composite under tensile and shear stress using infrared thermography and micrographic cuts", *Journal of Materials Science*, Vol. 50, pp. 6154-6170, 2015.
- [2] Lisle T., Bouvet C., Hongkarnjanakul N., Pastor M.L., Rivallant S., Margueres P. "Measure of fracture toughness of compressive fiber failure in composite structures using infrared thermography", *Composite Science and Technology*, Vol. 112, pp. 22-33, 2015.
- [3] Soumahoro Z., Etude du couplage thermomécanique dans la propagation dynamique de fissure, Ph.D. thesis, Ecole Polytechnique; 2005.
- [4] Dumoulin S, Louche H, Hopperstad O and Borvik T. (2010). Heat sources, energy storage and dissipation in high-strength steels: experiments and modeling. *Eur J Mech A/Solids*, 29:461–74.
- [5] Chrysochoos A, Louche H. (2000). An infrared image processing to analyse the calorific effects accompanying strain localisation. *Int J Eng Sci*, 38:1759–88.
- [6] Wattrisse B, Muracciole JM and Chrysochoos A. (2002). Thermomechanical effects accompanying the localized necking of semi-crystalline polymers. *Int J Therm Sci*, 41(5):422–7. *Int J Solids Struct*, 38(20):3549–3562.
- [7] Weichert R, Schonert K. On the temperature rise at the tip of a fast running crack. *J. Mech. Phys. Sol.* 1974, 22(2): 127–133.
- [8] Weichert R, Schonert K. Heat generation at the tip of a moving crack, *J. Mech. Phys. Sol.* 1978, 26(3): 151–161.
- [9] Taylor GI, Quinney H. "The latent energy remaining in a metal after cold working", *Proc. Roy. Soc. Part A*, Vol. 143(849), pp. 307-26, 1934.
- [10] Rittel D. (1999). On the conversion of plastic work to heat during high strain rate deformation of glassy polymers. *MechMater*, 31(2):131–139.
- [11] ZH L. and Lambros J. (2001) Strain rate effects on the thermomechanical behavior of polymers.
- [12] Allix O, Ladevèze P. Damage analysis of interlaminar fracture specimens, *Comp. Struc.* 1995, 31: 61-74.
- [13] Davies P, Protocols for interlaminar fracture testing of composites, ESIS-Polymers & Composites Task Group, IFREMER, Centre de Brest, 1993.
- [14] Pereira AB, Morais AB, Marques AT, CastroPT. Mode II interlaminar fracture of carbon / epoxy multidirectional laminates, *Comp. Sci. Tech.* 2004, 64: 1653–1659.