



HAL
open science

Utilisation de la thermographie infrarouge et de l'émission acoustique pour l'identification de l'endommagement d'un composite stratifié carbone-époxy

Victor Munoz Cuartas, Marianne Perrin, Marie-Laetitia Pastor, Hã©lã"ne Weleman, Arthur Cantarel, Moussa Karama

► To cite this version:

Victor Munoz Cuartas, Marianne Perrin, Marie-Laetitia Pastor, Hã©lã"ne Weleman, Arthur Cantarel, et al.. Utilisation de la thermographie infrarouge et de l'émission acoustique pour l'identification de l'endommagement d'un composite stratifié carbone-époxy. VIIIèmes Journées d'Etudes Techniques - International congress for applied mechanics JET 2014, Apr 2014, Marrakech, Maroc. hal-01058901

HAL Id: hal-01058901

<https://hal.science/hal-01058901>

Submitted on 28 Aug 2014

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.



Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID : 11900

To cite this version : Munoz Cuartas, Victor and Perrin, Marianne and Pastor, Marie-Laetitia and Weleman, Hélène and Cantarel, Arthur and Karama, Moussa Utilisation de la thermographie infrarouge et de l'émission acoustique pour l'identification de l'endommagement d'un composite stratifié carbone-époxy. (2014) In: VIIIèmes Journées d'Etudes Techniques - International congress for applied mechanics JET 2014, 28 April 2014 - 30 April 2014 (Marrakech, Morocco).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Utilisation de la thermographie infrarouge et de l'émission acoustique pour l'identification de l'endommagement d'un composite stratifié carbone-époxy

Munoz Victor¹,
Perrin Marianne²,
Pastor Marie-Laetitia²,
Welemanne Hélène¹,
Cantarel Arthur²,
Karama Moussa¹

¹ PRES Université de Toulouse, INP, ENIT-LGP, 47 av. Azereix, BP 1629, 65016 Tarbes Cedex, France; E-Mails: victor.munozcuartas@enit.fr; helene.welemanne@enit.fr; moussa.karama@enit.fr

² PRES Université de Toulouse, IUT-ICA, 1 rue Lautréamont, BP 1624, 65016 Tarbes Cedex, France; E-Mails: marianne.perrin@iut-tarbes.fr; marie-laetitia.pastor@iut-tarbes.fr; arthur.cantarel@iut-tarbes.fr

Résumé :

Le manque de connaissances dans le comportement des matériaux composites à base carbone induit encore de nombreux surcoûts pour la fabrication des structures aéronautiques. Lorsqu'une structure stratifiée en matériaux composites est sollicitée, la dégradation de ses propriétés est effective avant sa rupture. Actuellement, un certain nombre de techniques de contrôle non destructif visent à caractériser les propriétés mécaniques d'un matériau de manière à estimer l'importance de cet endommagement. La caractérisation ultrasonore en immersion donne notamment accès aux constantes élastiques du matériau. La thermographie infrarouge et les émissions acoustiques permettent quant à elles de déterminer la charge élastique et de mettre en évidence le début de l'endommagement. Ce document présente un couplage de la thermographie infrarouge et de la mesure des émissions acoustiques de façon à contrôler la structure en temps réel lors du chargement. Cette méthodologie est mise en œuvre sur des composites carbone-époxy unidirectionnels sollicités en traction uniaxiale dans des situations dans et hors axes. La corrélation des différentes techniques permettent une compréhension fine de l'endommagement de ces structures composites.

1. Introduction

L'utilisation des composites dans l'industrie aéronautique a augmenté fortement depuis les années 70s [1]. Pour certaines applications, ces matériaux constituent une alternative intéressante aux matériaux métalliques. Leurs propriétés les plus importantes sont notamment : un rapport résistance/poids élevé, l'absence de corrosion et l'amortissement des vibrations [2,3,4]. Cependant, la variabilité de leur comportement, liée notamment à la présence de défauts microscopiques initiaux ou induits en service, constitue un frein encore important à leur développement. Cette incertitude du comportement se traduit alors par une forte dispersion dans la durée de vie de ces structures. Devant la difficulté de prédire leur comportement lors du chargement de la structure, des coefficients de sécurité très sévères sont généralement appliqués, tant sur les chargements que sur les résistances des matériaux, amenant inévitablement à des surcoûts élevés [5].

L'optimisation du dimensionnement des structures composites requiert en premier lieu une caractérisation des processus d'endommagement sous chargement. Les données identifiées permettront ensuite de prédire le comportement de la structure grâce à des modèles adaptés. Dans ce domaine, les caractérisations expérimentales non destructives présentent un avantage majeur avec la possibilité d'étudier les mécanismes de dégradation sans perturbation liée à la mesure en elle-même. En ce qui concerne l'industrie aéronautique, plusieurs méthodes de contrôle non destructif (CND) sont actuellement utilisées et développées pour identifier et caractériser les défauts et endommagements des aérostructures [6,7,8]. La plus avancée est la technique de mesure par ultrasons qui donne accès aux propriétés mécaniques d'un matériau composite. A l'aide de mesures des temps de vol de l'onde à l'intérieur du matériau pour différents angles d'incidence, il est possible de reconstruire la matrice de rigidité du matériau [9,10].

La thermographie infrarouge est une technique de mesure encore en développement dans l'aéronautique. Elle consiste en un relevé 2D des rayonnements thermiques (luminances énergétiques) émis par la surface observée et qui dépendent de la température de la matière [3]. Pour les applications dans le domaine de la mécanique, les rayonnements mesurés peuvent résulter de deux sources : une excitation extérieure (lampes halogènes, flash au xénon IDEM, lasers, ondes ultrasonores, courants de Foucault, etc.) dont on récupère les effets en réflexion ou en transmission [11]. La deuxième source est la déformation du matériau en elle-même du fait de couplages thermoélastiques et de dissipations sous forme de chaleur lorsque le matériau est affecté par des mécanismes irréversibles tels que la plasticité ou l'endommagement; cette méthode dite passive est adaptée au suivi de dommages sous sollicitation avec des applications en chargement monotone [3] ou en fatigue [5,12].

La mesure des émissions acoustiques constitue également un moyen de détection et de localisation de l'endommagement. Dans les matériaux composites, les émissions acoustiques se produisent lorsque le matériau subit des dégradations internes sous l'effet d'une contrainte croissante ou variable (plastification, fissuration, délaminage, ruptures de fibres, etc.) [13]. Cette technique utilise des capteurs d'émission acoustique couplés à la pièce. Par la mesure des temps de réception des signaux par les différents capteurs, il est possible de localiser la source d'émission acoustique [14,15].

Dans ce travail, nous avons étudié un matériau composite stratifié unidirectionnel à fibres de carbone et résine époxy. Des essais de traction uniaxiale pour trois directions particulières de fibres (0°, 45° et 90°) ont été effectués. Les réponses contrainte-déformation obtenues ont permis en premier lieu de déterminer les propriétés élastiques du matériau. Ces résultats, issus d'essais mécaniques, corroborent les identifications issues du CND par mesures ultrasonores. Les acquisitions simultanées des champs de température par caméra infrarouge et des émissions sonores par capteurs acoustique ont permis également d'identifier et de quantifier les processus irréversibles induits par le chargement. Des corrélations peuvent notamment être faites entre la variation de température moyenne surfacique de la pièce composite et les signaux d'émission acoustique.

2. Matériau et protocole expérimental

1. Statifié carbone-époxy unidirectionnel

Le matériau étudié est un composite stratifié unidirectionnel de fibre de carbone et résine époxy. 14 couches unidirectionnelles de préimprégné de carbone [16] ont été empilées, conduisant à une épaisseur finale de composite de 2 mm. L'empilement a été placé en autoclave à 125°C pendant 90 minutes sous une pression de 2 bars. La plaque obtenue a été découpée selon la norme ISO 527-5 [17]. Trois directions de fibres ont été obtenues avec la découpe de la plaque (0°, 45° et 90°) par rapport à l'axe de sollicitation de l'éprouvette. Les essais dans les axes permettront de capter la réponse des fibres (purement élastique fragile) alors que les essais hors-axes (à 90° et 45°) intégreront plus ou moins la réponse de la résine (visco-élastique fragile). Les dimensions finales sont présentées sur la Figure 1. Les talons des éprouvettes ont été fabriqués à partir de fibre verre et résine époxy à +/-45°.

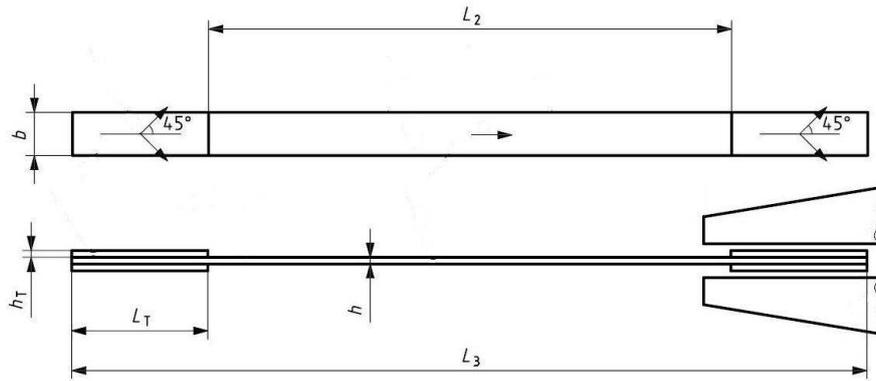


Figure 1. Epreuve de traction. La largeur b est de 25 mm, la longueur totale L_3 est de 250 mm, la longueur utile L_2 est de 150 mm, l'épaisseur de l'échantillon en carbone h et des talons h_T fait 2 mm [17].

2. Protocole expérimental

Les essais ont eu lieu à température et pression ambiantes, dans une pièce thermorégulée à 25°C. Selon l'orientation des fibres, les conditions expérimentales suivent la norme NF EN ISO 527-5 [17]. La vitesse de chargement est de 2 mm/min pour les éprouvettes à 0°, de 1 mm/min pour les éprouvettes à 90° et de 1.5 mm/min pour les éprouvettes à 45°. Pour le chargement monotone, une machine de traction électromécanique INSTRON 5500R a été utilisée. Afin de mesurer la reproductibilité des tests, trois éprouvettes ont été considérées pour chaque direction testée.

Les éprouvettes (trois par direction) ont été équipées de jauges de déformation HBM K-LY41-6/350-3-2M (Figure 2). Ces jauges sont reliées à une centrale d'acquisition de type HBM Spider 8.30 et les données traitées à l'aide du logiciel Catman Easy. La direction x_3 représente l'axe de fibres, la direction x_2 représente la direction transversale aux fibres et la direction x_{45° représente la direction à 45° des fibres. Parallèlement, un système de corrélation d'images a aussi été mis en place afin de corroborer les informations données par les jauges. La corrélation d'images consiste à mettre en correspondance deux images numériques d'une surface plane munie de marqueurs (sous la forme de points de peinture) observée à deux états distincts de déformation. Le traitement d'images permet alors d'en déduire la déformation en ces points pour chaque état de chargement. Le système de corrélation employé est composé d'un capteur Aramis. Le capteur est constitué de deux caméras CCD 1392 x 1040 pixels, associé au logiciel Aramis pour le traitement numérique. On notera que les jauges et le suivi des marqueurs se font sur la même face de la caméra (Figure 3).

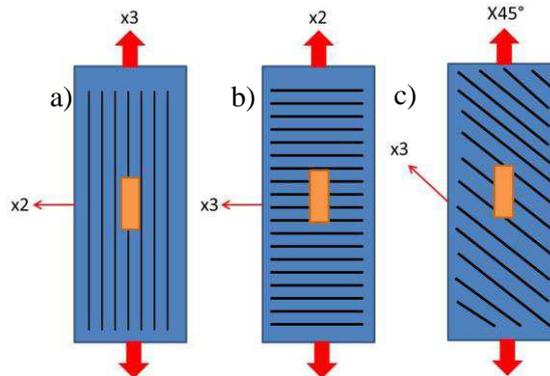


Figure 2. Epreuve de traction. a) éprouvette à 0°, b) éprouvette à 90°, c) éprouvette à 45°.

Sur la face opposée de l'éprouvette (Figure 3), une acquisition thermique a été réalisée à l'aide d'une caméra infrarouge CEDIP JADE III rétrofittée FLIR Titanium SC 7000 (capteurs InSb, plan focal de 320×256 pixels, résolution thermique de 20 mK). Une fréquence d'acquisition de 148 images par seconde a été considérée durant les essais. Le traitement des images, réalisé avec le logiciel Altair, a été fait en mode relatif pour lequel on extrait les dix premières images du film à l'ensemble des champs thermiques de façon à limiter les effets de l'environnement et à pouvoir se focaliser uniquement sur les variations de température induites par le chargement.

Des capteurs d'émission acoustique WD avec largeur de bande associés à des préamplificateurs de 40 dB connectés à une chaîne d'acquisition PCI8 à 8 voies ont été employés, le traitement de signaux se faisant à l'aide du logiciel AEwin. Pour chaque éprouvette, deux capteurs ont été positionnés en ses extrémités (distance entre les capteurs de 122 mm) de façon à permettre une localisation linéaire des événements. Ceci nécessite préalablement à l'essai de définir les vitesses d'onde pour chaque direction de fibres à l'aide ici du test Hsu-Nielsen [18] (Tableau 1). Ce test permet aussi de vérifier le couplage entre les deux capteurs. Le seuil de détection d'émission acoustique est fixé à 32 dB en fonction des bruits ambiants.

Direction de fibres	Vitesse de l'onde (m/s)
0°	9174
45°	3104
90°	2355

Tableau 1. Vitesse d'onde pour différentes directions de fibres

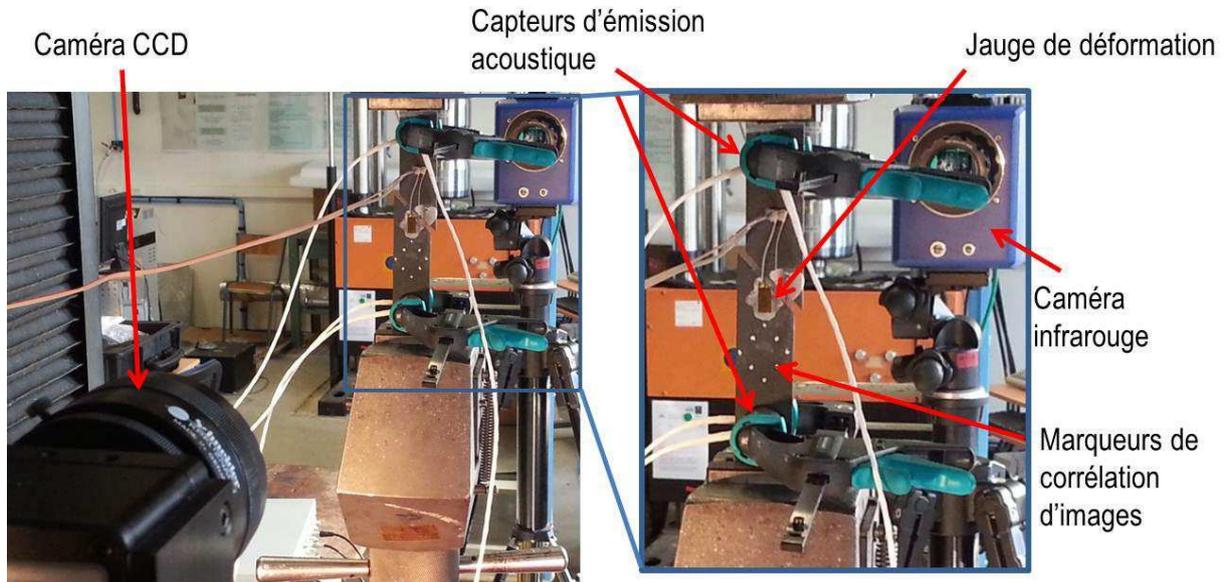


Figure 3. Protocole expérimental

3. Résultats

1. Caractérisation mécanique

La Figure 4 présente les courbes contrainte-déformation pour les trois types d'éprouvettes déduites des mesures des jauges. Dans le cas particulier de l'éprouvette à 0°, la charge maximale de la machine ne permet pas d'affecter la contrainte de rupture de 2600 MPa définie par le fabricant, soit une charge de 130 kN compte tenu des dimensions de l'éprouvette (Figure 1). Pour cet essai donc, le comportement obtenu correspond à la partie élastique et au début de l'endommagement. En revanche, les essais à 90° et 45° ont pu être effectués jusqu'à la rupture finale de l'échantillon.

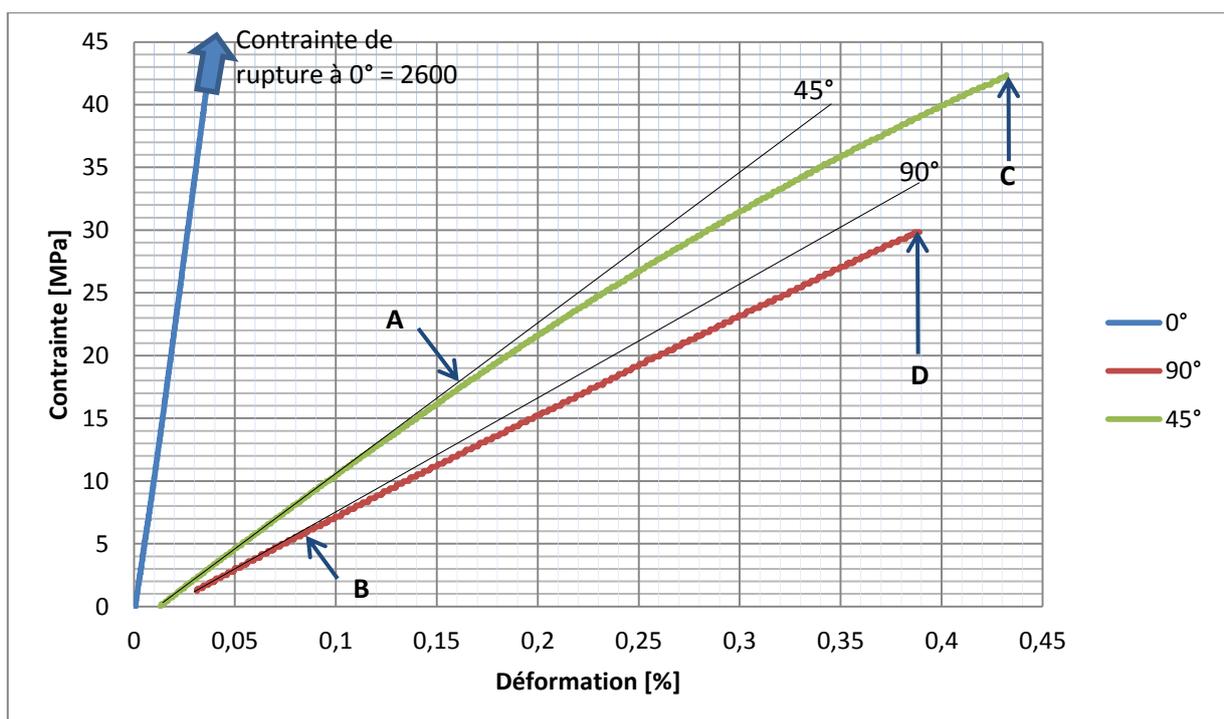


Figure 4. Courbe contrainte-déformation obtenue par les jauges pour les trois directions de fibres

Les domaines élastiques des essais de traction dans les trois directions de fibres permettent d'identifier une partie des cinq constantes mécaniques du matériau orthotrope étudié. Le tableau 2 récapitule ainsi les valeurs obtenues via les jauges et la corrélation d'images. En guise de référence, y figurent également la caractérisation issue du CND par ondes ultrasonores en immersion effectuée sur ce même matériau [19] ainsi que les données fabricant et des résultats de la littérature. Dans l'ensemble, on observe une bonne corrélation entre les mesures issues des différentes méthodes.

		E ₃ [GPa]	E ₂ [GPa]	E _{45°} [GPa]	ν ₃₂	ν ₂₃	G ₃₂ [GPa]
Traction - Jauges	Moyenne	138,22	8,22	12,51	0,3398	0,0279	5,11
	Ecart type	10,52		0,83			
Traction- Correlation	Moyenne	130,45	8,37	11,87	0,2932	0,0214	4,66
	Ecart type	4,17			0,0406		
Caractérisation US par immersion	Moyenne	117,61	8,00	10,64	0,3250	0,0205	3,90
	Ecart type	1,41	0,05	0,40	0,0050	0,0005	0,20
Littérature [20]		134,00	7,00		0,2500		4,20
Fabricant (Hexcel) [16]		140,00					

Tableau 2. Constantes mécaniques pour les différentes techniques de caractérisation (E : module d'Young, ν : coefficient de Poisson, G : module de cisaillement)

2. Identification de l'endommagement

Les Figures 5, 6 et 7 présentent l'évolution temporelle de la température moyenne en surface de l'éprouvette au cours du temps (courbe bleue) pour les directions 0°, 45° et 90° respectivement. Sur la même échelle de temps est présentée l'amplitude des événements d'émission acoustique (points rouges). Dans les trois figures, on remarque tout d'abord une zone purement élastique durant laquelle la température moyenne est quasi constante et où il n'y a pas d'événements acoustiques remarquables. Cette étape dure environ 30 s pour les trois essais. Sur le plan thermique, on note ensuite la mise en place majoritaire de la réponse thermo-élastique induisant un faible réchauffement global à 0° et un refroidissement plus important pour les essais à 45° et 90°. Le composite carbone-époxy unidirectionnel présente en effet un coefficient de dilatation positif dans l'axe des fibres ($3.4 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ dans l'axe longitudinale) et négatif hors des axes des fibres ($-0.12 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ dans le sens transverse) [20]. Parallèlement, on observe durant cette phase une activité sonore, notamment pour l'essai à 0° avec de nombreux événements compris entre 30 dB et 65 dB, dont l'amplitude et le nombre d'événements augmentent dans tous les cas avec la contrainte appliquée. Ceci montre donc que, bien que cela n'influence pas nettement la réponse thermique, le matériau est bien déjà affecté à ce stade par des mécanismes irréversibles de dégradation. Si l'on met en regard les courbes de contrainte-déformation complètes dont on dispose, soit pour les essais à 45° et à 90°, on note que l'amorce de cette étape correspond bien au début de la non linéarité du comportement du matériau (contrainte axiale autour de 18 MPa (point A sur la figure 4 et 6) au bout de 28s pour l'essai à 45°, contrainte axiale égale à 6 MPa (point B sur la Figure 4 et 6) au bout de 30s pour l'essai à 90°, Figure 4).

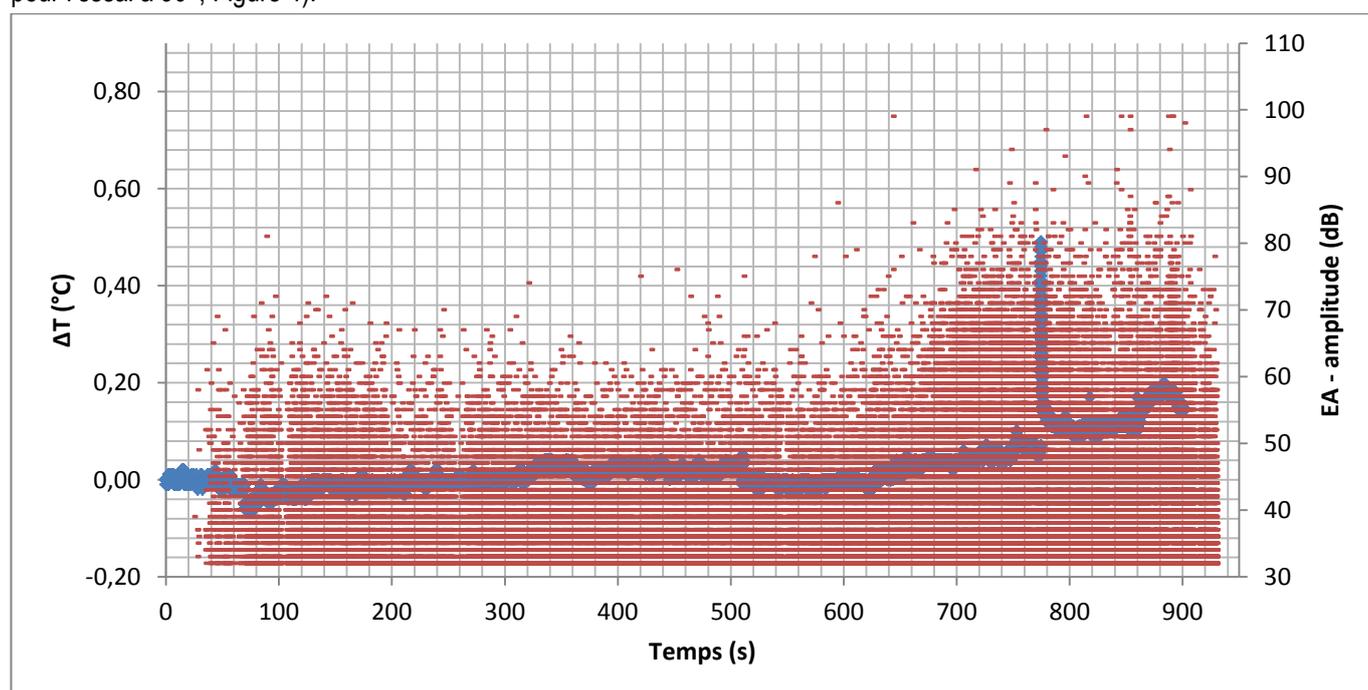


Figure 5. Traction à 0° - Température moyenne et amplitude des événements acoustiques en fonction du temps.

A 0°, le pic de température aux alentours de 770 secondes correspond à une décohésion macroscopique parallèle à l'axe de sollicitation (donc parallèle aux fibres) : les mesures effectuées captent bien l'impact majeur de cette dégradation tant au niveau thermique (accroissement global de 0.50°C) que des émissions acoustiques (plusieurs évènements autour de 100dB). Pour les essais à 45° et 90°, le phénomène de rupture (point C et point D sur la Figure 6 et 7 respectivement) s'accompagne également de cette élévation de température moyenne et de l'intensification de l'activité sonore.

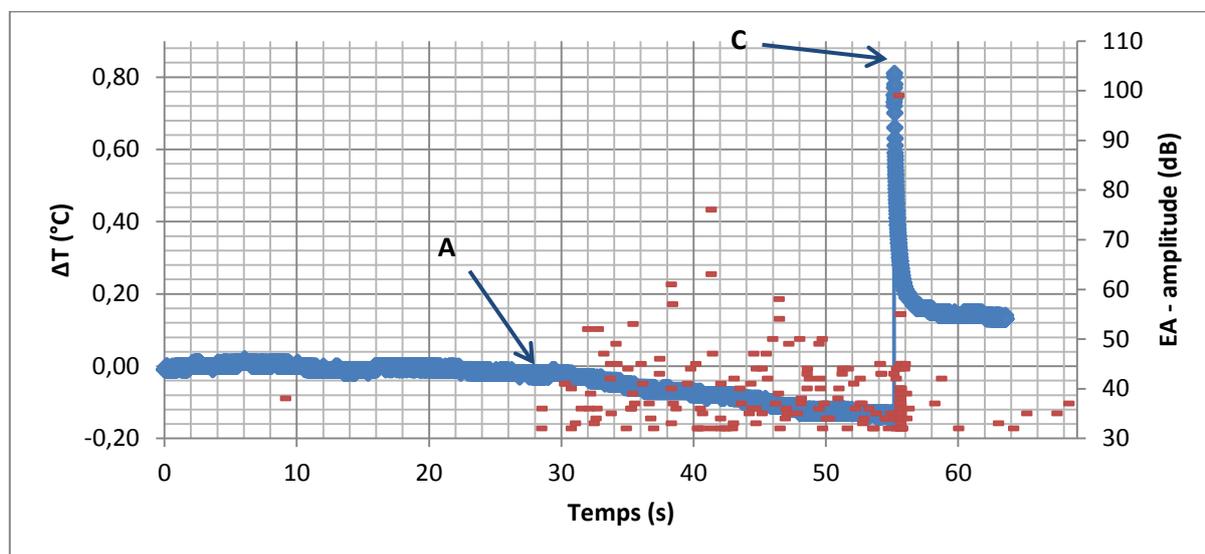


Figure 6. Traction à 45° - Température moyenne et amplitude des événements acoustiques en fonction du temps.

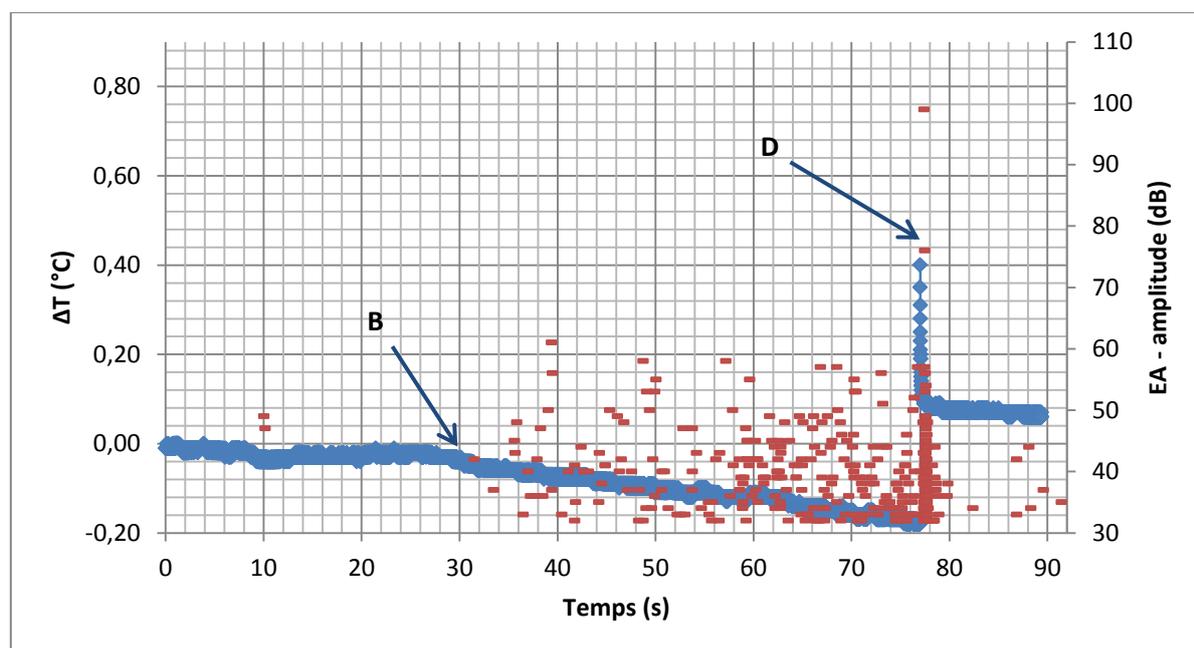


Figure 7. Traction à 90° - Température moyenne et amplitude des événements acoustiques en fonction du temps.

4. Conclusion

Les essais de traction dans les différents orientations des fibres a permis de caractériser le matériau et de comparer avec les valeurs obtenues par caractérisation ultrasonore (Tableau 2).

Concernant la thermographie infrarouge et l'émission acoustique en suivi d'essai, on constate une très bonne corrélation des deux techniques. Il semble que l'on puisse détecter le début de l'endommagement des matériaux composites par ces 2 techniques.

Cette étude expérimentale constitue le socle de travaux futurs pour la modélisation de l'endommagement de stratifiés en carbone-époxy et leur caractérisation sous sollicitation de fatigue. Nous avons en effet d'une part, pu confirmer par des essais mécaniques les valeurs des propriétés élastiques de ce matériau orthotrope obtenues par CND ultrasonore et, d'autre part, mettre en place une procédure de suivi non destructif par thermographie infrarouge et émissions acoustiques sous sollicitation mécanique. Les premiers résultats sont encourageants pour la suite et démontrent une bonne corrélation entre les techniques employées.

5. Bibliographie

- [1] GAO United States Government Accountability Office. *Status of FAA's Actions to Oversee the Safety of Composite Airplanes*. GAO-11-849, 2011.
- [2] CINQUIN J. *Les composites en aérospatiale*. AM5645, Techniques de l'Ingénieur, 2002.
- [3] GOIDESCU C. *Caractérisation et modélisation de l'endommagement par microfissuration des composites stratifiés - Apports des mesures de champs et de l'homogénéisation*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2011.
- [4] MISTOU S. *Développement d'un élément fini de coque composite à double courbure pour l'implémentation d'une application orientée objet*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, France, 2000.
- [5] GARNIER C. *Etude du comportement dynamique des structures composites réalisées par LRI : application à l'impact et à la fatigue*. Thèse de doctorat, Université Toulouse, 2011.
- [6] DIAMANTI K., SOUTIS C. *Structural Health Monitoring Techniques for Aircraft Composite Structures*. Progress in Aerospace Sciences, 2010, vol. 46, n° 8, pp. 342-352.
- [7] FRAMEZELLE G., LEPILLER F. *Contrôle non destructif de structures composites pour l'aéronautique* Composite Park, Porcellette, France, 2010.
- [8] GARNIER C., PASTOR M.L., EYMA F., LORRAIN B. *The Detection of Aeronautical Defects in Situ on Composite Structures Using Non Destructive Testing*. Composite Structures, 2011, vol. 93, n° 5, pp. 1328-1336.
- [9] CHU Y.C., DEGTYAR A.D., ROKHLIN S.I. *On determination of orthotropic material moduli from ultrasonic velocity data in nonsymmetry planes*. J. Acoust. Soc. Am., 1994, vol. 95, n° 6, pp. 3191-3203.
- [10] BALASUBRAMANIAM K., WHITNEY S.C. *Ultrasonic through-transmission characterization of thick fibre-reinforced composites*. NDT&E International, 1996, vol. 29, n° 4, pp. 225-236.
- [11] PERONNET É. *Identification expérimentale du comportement d'un fuselage composite : détection de défauts par mesures de champs*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2012.
- [12] LUONG M.P. *Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique*. Mechanics of Materials, 1998, vol. 28, n° 1-4, pp.155-163.
- [13] ROGET J. *Emission acoustique*. r3200, Techniques de l'Ingénieur, 1990.
- [14] KIM S.T., LEE Y.T. *Characteristics of damage and fracture process of carbon fiber reinforced plastic under loading-unloading test by using AE method*. Materials Science and Engineering: A, 1997, vol. 234-236, pp. 322-326.
- [15] PERRIN M. *Etude et caractérisation par émission acoustique et mesures électrochimiques de la fragilisation par l'hydrogène des câbles de précontrainte. Application aux ouvrages d'art*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2009.
- [16] Hexcel Corporation. <http://www.hexcel.com/>. Composites materials, 2013
- [17] Norme NF EN ISO 527-5. *Plastiques - Détermination des propriétés en traction - Partie 5 : Conditions d'essai pour les composites plastiques renforcés de fibres unidirectionnelles*. AFNOR, 2009.
- [18] Norme NF EN 1330-9. *Essais non-destructifs - Terminologie - Partie 9 : Termes utilisés en contrôle par émission acoustique*. AFNOR, 2009.
- [19] MUNOZ V., PERRIN M., PASTOR M.L., WELEMANE H., CANTAREL A., KARAMA M., *Identification of elastic properties of composite méterials*. ICSAAM, Grèce, 2013.
- [20] GAY D. *Matériaux composites*. 5ème édition, édition Lavoisier, chapitre 3, 2005.