



HAL
open science

Détermination rapide de la limite de fatigue d'éprouvettes composites carbone-époxy tissés soumises à un impact basse énergie

Laurent Gornet, Deepika Sudevan, Modesto Mateos, Laurentzi Aretxabaleta,
Patrick Rozycki

► **To cite this version:**

Laurent Gornet, Deepika Sudevan, Modesto Mateos, Laurentzi Aretxabaleta, Patrick Rozycki. Détermination rapide de la limite de fatigue d'éprouvettes composites carbone-époxy tissés soumises à un impact basse énergie. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01621545

HAL Id: hal-01621545

<https://hal.science/hal-01621545>

Submitted on 23 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.

Détermination rapide de la limite de fatigue d'éprouvettes composites carbone-époxy tissés soumises à un impact basse énergie

Rapid determination of the limit of fatigue for woven carbon-fiber epoxy matrix composite materials initially submitted to a low energy impact

Laurent Gornet¹, Deepika Sudevan¹, Modesto Mateos², Laurentzi Aretxabaleta², Patrick Rozycki¹,

¹: Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) - UMR CNRS
Ecole Centrale de Nantes, 6183
1 rue de la Noë - BP 92101 - 44321 Nantes cedex 3

²: Departamento de Mecánica y Producción Industrial
Escuela Politécnica Superior de Mondragon Unibertsitatea
Loramendi 4 - 20500 Mondragón (Espagne)

e-mail : laurent.gornet@ec-nantes.fr, patrick.rozycki@ec-nantes.fr, mmateos@mondragon.edu,

Résumé

De nos jours, les matériaux composites tissés carbone époxy sont utilisés dans différents domaines industriels notamment dans la réalisation des structures primaires aéronautiques. La chute des propriétés mécaniques en compression après impact est un phénomène bien connu. Cette étude porte sur la caractérisation de la limite d'endurance en traction de matériaux composites impactés par une méthode rapide dite d'auto-échauffement. L'objet de cette étude est d'améliorer la compréhension et la modélisation du comportement mécanique en fatigue à grand nombre de cycles des matériaux composites tissés carbone époxy comprenant des endommagements initiaux. Ces endommagements sont issus d'un impact à basse énergie. Les éprouvettes étudiées comportent huit couches réalisées à l'aide de tissus secs HCP 482 imprégnés d'une résine Araldite® LY 556 et d'un durcisseur HY 917. Les premiers résultats montrent que la méthode d'auto-échauffement permet d'estimer la limite de fatigue des éprouvettes impactées. Les résultats de cette méthode rapide et innovante sont comparés avec succès avec ceux issus des essais classiques de fatigue à grand nombre de cycles.

Abstract

Nowadays, carbon-fiber epoxy-matrix woven composite materials are used in various industrial fields, particularly in the realization of primary aeronautical structures. Reduction of the mechanical properties in compression after impact is a well-known phenomenon. This work is focused on the characterization of the tensile endurance limit of composite materials impacted by a rapid method known as self-heating. The aim of this study is to improve understanding of this phenomenon, and more accurately model the high-cycle fatigue mechanical behavior of carbon-fiber epoxy-matrix woven composite materials, including an initial damage state resulting from a low energy impact. The specimens were made of eight layers dry HCP 482 fabrics impregnated with an Araldite® LY 556 resin and an HY 917 hardener. Initial results show that the self-heating method allows to estimate the limit of impacted specimens in fatigue. The results of this rapid and innovative method are successfully compared with those obtained from classic, large cycle, fatigue tests.

Mots Clés : Impact fatigue, essais d'auto-échauffement

Keywords: Impact, fatigue, self-heating tests

1. Introduction

La détermination rapide des propriétés de fatigue à grand nombre de cycles par la méthode d'auto-échauffement permet d'obtenir la limite de fatigue d'un pli élémentaire d'un matériau composite en quelques heures. Cette méthode initialement proposée pour les matériaux métalliques [1, 2] a été

développée pour des stratifiés unidirectionnels carbone/époxy et des tissus carbone thermoplastique [3-4]. Dans cette nouvelle étude, la méthode d'auto-échauffement est réalisée avec succès sur un tissu à fibres de carbone et matrice époxy HCP 482 époxy Araldite® LY 556 possédant une zone impactée au centre de l'éprouvette. Cette zone endommagée est due à un impact de basse énergie de 10 J ou 20 J réalisé à l'aide d'une machine d'impact Ceast. Les essais d'auto-échauffement ont été menés à température ambiante à une fréquence de 5 Hz sous un rapport de charge de $R=0,1$. Les essais menés sur une base canonique d'éprouvettes ont permis d'estimer les propriétés mécaniques et les limites de fatigue du tissu dans le sens chaîne et d'un stratifié quasi-isotrope. Les résultats de la campagne d'impact sont d'abord présentés. Les essais quasi-statiques réalisés sur les éprouvettes impactées sont ensuite observés. Enfin les essais d'auto échauffement destinés à déterminer la limite de fatigue sont présentés dans le cas d'éprouvettes initialement impactées. Finalement des essais de fatigue sont menés pour valider les limites d'endurance obtenue par la méthode d'auto-échauffement.

2. Campagne expérimentale d'impacts

Une campagne d'essais d'impact a été réalisée sur des éprouvettes tissées carbone époxy HCP 482 époxy Araldite® LY 556 à l'aide d'une tour de chute Ceast de capacité variant de 6 J à 90 J. La machine d'essais d'impact est présentée sur la figure 1. Le dispositif de maintien de l'éprouvette dans la machine permet de définir une zone circulaire encastrée sur son pourtour pouvant recevoir un impact localisé en son centre. Il est également possible de légèrement décentrer la zone de l'impact afin de faire apparaître un bord libre sur le côté de l'éprouvette. Cette configuration conduit à des éprouvettes plus fortement endommagées vers le bord libre. Les deux configurations ont été retenues. La géométrie de l'impacteur est un hémisphère de diamètre 20 mm. La masse retenue est de 5.2 Kg et la hauteur de chute a été calibrée afin de réaliser des impacts de 10 J ou 20 J. L'énergie de 10 J ne provoque pas de dommages sur la surface du matériau alors que l'énergie d'impact de 20 J permet de détecter visuellement une zone d'impact (Barely Visible Impact Damage criteria) [4]. Deux stratifications ont été testées, le sens chaîne [0-90] et un stratifié quasi-isotrope [QI]. La réponse force déplacement de l'éprouvette dans le sens chaîne est présentée Fig 2. Un enfoncement quasi circulaire maximum de 0.3 mm est présent sur la surface impactée (Fig. 2) d'une éprouvette [0-90]. Dans le cas des éprouvettes quasi-isotrope [QI], les endommagements issus de l'impact peuvent être localisés à l'interface des torons, dans la matrice (Fig. 3) ou dans les torons de fibres.



Fig 1. Machine d'impact Ceast avec une masse 5.2Kg. L'impact à lieu dans une zone circulaire encastrée sur son contour

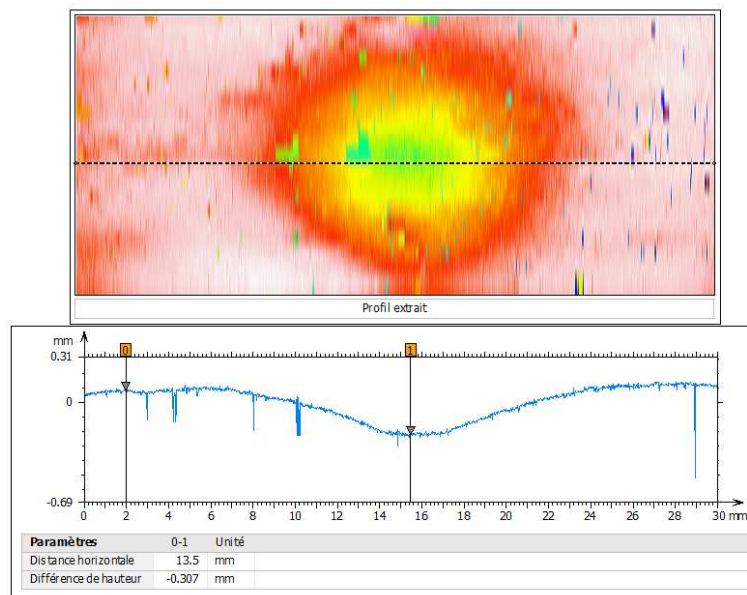


Fig 2. Isovaleurs de la zone résiduelle d'impact d'un carbone quasi-isotrope. Après 15 Jours la zone permanente présente un enfoncement maximum irréversible de -0.307mm.

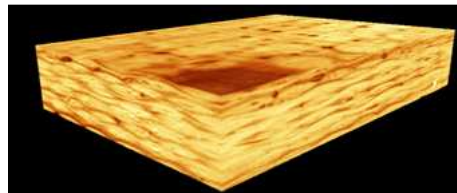


Fig 3. Quart d'éprouvette quasi-isotrope impactée à 20J. Les fissures sont majoritairement à l'extérieur de la zone d'impact. La zone sombre représente les déformations résiduelles dues à l'indenteur.

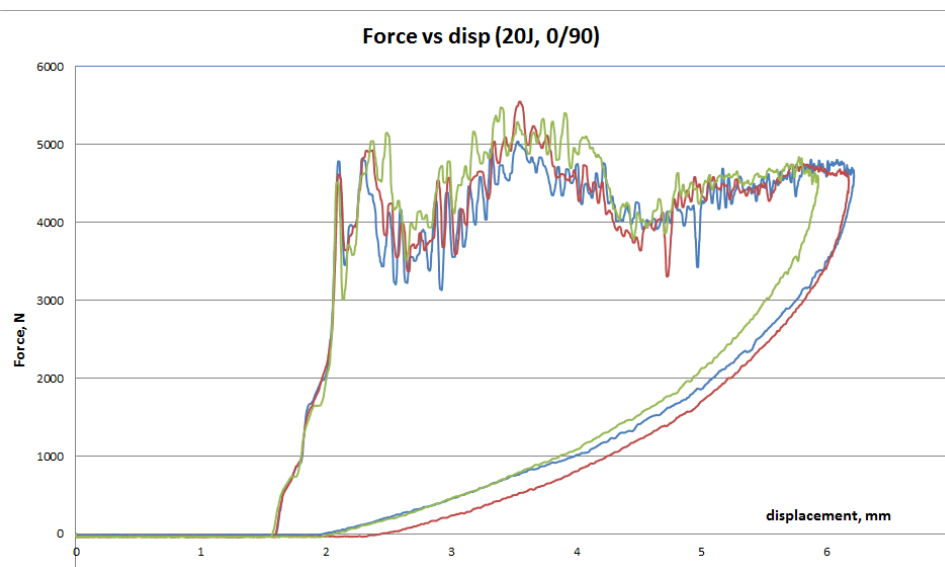


Fig 4. Réponse force déplacement de la machine d'impact Ceast pour les éprouvettes sens chaîne [0-90] lors d'un impact de 20 J.

3. Caractérisation du pli élémentaire de tissu carbone époxy

Les essais mécaniques quasi-statiques destinés à la caractérisation des matériaux composites sont exécutés à l'aide d'une machine hydraulique MTS d'une capacité de 10 tonnes. Ils ont été menés à

déplacement imposé avec une vitesse de chargement de 0.01 mm/s. Pour caractériser le matériau, des essais de traction ont été réalisés sur des empilements de tissu sens chaîne, trame et suivant la bissectrice de la chaîne et de la trame. Les résultats des essais de traction réalisés sur des éprouvettes stratifiées dans les sens chaîne [0,90] et quasi-isotropes [QI] montrent la chute des propriétés mécaniques due à l'impact. Les résultats issus des essais de traction (Fig. 5) sur des éprouvettes, non impactées (Pristine), impactées à 10 J (10J IMP) ou 20 J (20J IMP) montrent bien l'influence d'un impact initial. La thermographie passive est employée pour suivre en continu l'évolution du champ de température à la surface du matériau. Elle permet entre autre la localisation des sites d'initiation de l'endommagement. Des thermocouples K ou une caméra thermique de type Cedip Infrared Systems (matrice de 320*240 détecteurs Mercure-Cadmium-Telluride) sont utilisés pour le dispositif de mesures thermiques. L'acquisition des données est réalisée à l'aide d'une électronique de mesure QuantumX HBM (logiciel Catman®).

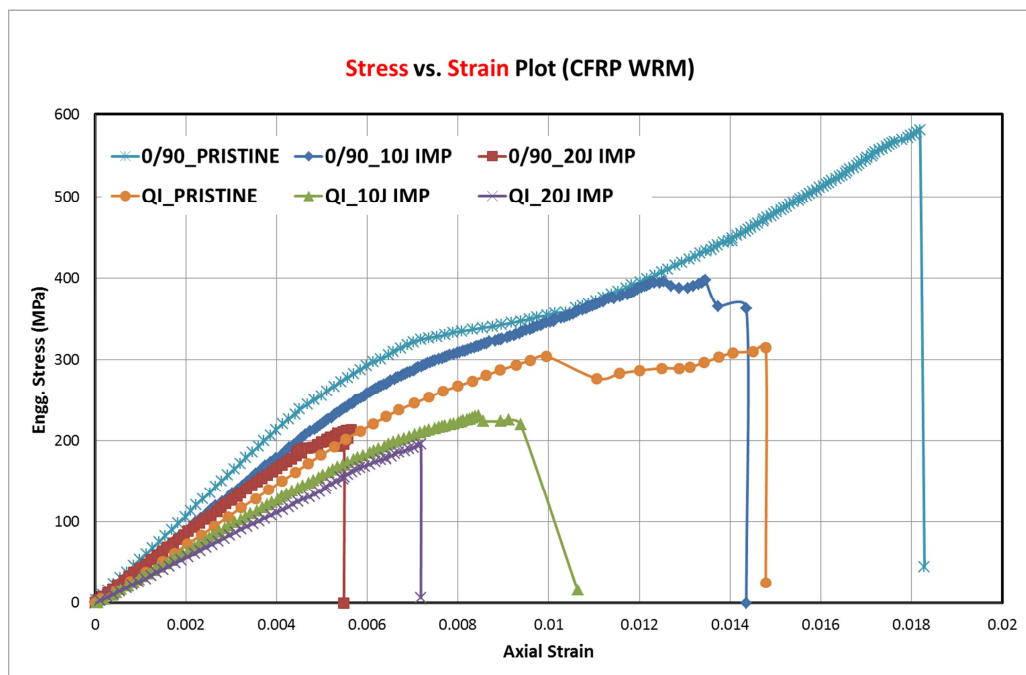


Fig 5. Essais de traction : Contrainte axiale en fonction de déformation axiale pour les éprouvette sens chaîne [0,90] et sur stratifiés quasi-isotropes [QI]. Les réponses sont présentées pour les éprouvettes vierges de dommage d'impact (Pristine), les éprouvettes impactées à 10J (10J IMP) ou 20J (20J IMP)

Les propriétés mécaniques macroscopique des stratifiés HCP482/LY556 sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1. Propriétés élastiques et contraintes de rupture quasi-statique sens chaîne du HCP482/LY556

Configurations	E_1	σ_{11}^R	ν_{12}
(0/90) ₈ Pristine	225 MPa	525 MPa	0.118
(0/90) ₈ 10J Imp.	223.5 MPa	400 MPa	0.098
(0/90) ₈ 20J Imp.	145 MPa	214 MPa	0.157

4. Essais d'auto-échauffement

La méthode auto-échauffement proposée initialement pour les métaux [1,2] a été développée avec succès pour un matériau UD carbone/époxy dans [3] et un tissu carbone thermoplastique dans [2].

L'ensemble des essais de fatigue et auto-échauffement ont été menés sur des stratifiés symétriques HCP 482 époxy LY 556. Les dimensions des éprouvettes ainsi que l'emplacement des thermocouples K utilisés pour les mesures thermiques sont présentés sur la figure 6. Les essais d'auto-échauffement effectués consistent en un chargement cyclique de type traction-traction à $R=0.1$. L'éprouvette subit une suite de plusieurs blocs de chargement à contrainte moyenne constante mais d'amplitude croissante (Fig. 7). Durant chacun de ces blocs de chargement, on enregistre l'évolution de la température moyenne en surface d'éprouvette et on détermine une température moyenne stabilisée pour chaque bloc. Chaque bloc de chargement cyclique est précédé d'une montée en charge, jusqu'à atteindre la contrainte moyenne choisie, effectuée en contrôle en déplacement à une vitesse de 2 mm/min. La phase de chargement cyclique comprend 4000 cycles d'amplitude de contrainte constante, de façon à ce que l'éprouvette stratifiée atteigne un état d'équilibre thermique. Ensuite, un retour à contrainte nulle à une vitesse de déplacement de la traverse de 2 mm/min est programmé. Entre chaque bloc de chargement, des pauses sont programmées afin de permettre à l'éprouvette un retour à l'équilibre thermique à température ambiante de l'éprouvette (Fig. 7). Cette procédure contraignante permet de mieux maîtriser la qualité de l'indicateur thermique lié à l'évolution des endommagements. L'évolution de la température en surface des éprouvettes durant les chargements cycliques est mesurée grâce à une caméra thermique CEDIP. Le suivi de la température est également validé avec des thermocouples K afin de rendre la méthode rapidement opérationnelle d'un point de vue industriel. La méthode d'auto-échauffement dépouillée avec des thermocouples a déjà été validée sur des éprouvettes ne comportant pas de gradient de propriétés mécaniques. Dans cette étude, la méthode d'auto-échauffement a été adaptée pour des éprouvettes impactées comportant un gradient spatial d'endommagement. Sept thermocouples sont installés dans la longueur des éprouvettes vierges. Les éprouvettes impactées sont divisées en cinq zones géographiques. Neufs thermocouples sont utilisés pour les éprouvettes impactées (Fig. 6). Les zones géographiques sont nommées : zones 3 pour la partie haute et basse de l'éprouvette, zone 2 à gauche de l'impact et zone 1 à droite de l'impact, zone 0 pour l'impact. Les températures des mors sont également enregistrées lors des essais afin de corriger un éventuel gradient thermique provenant de l'échauffement de la machine d'essai.

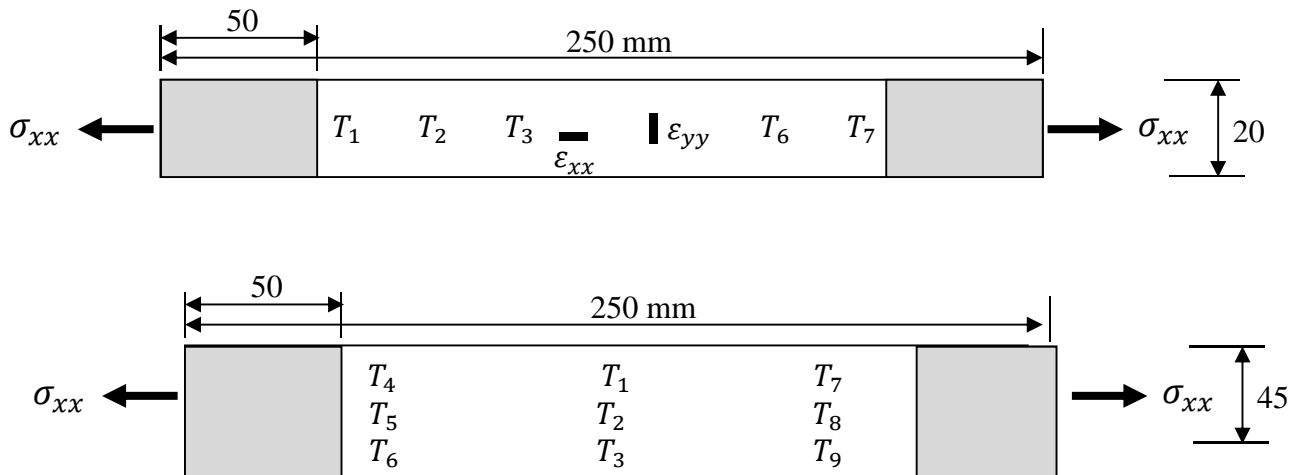


Fig 6. Dimensions nominales en mm des éprouvettes testées en fatigue et auto-échauffement. Sept thermocouples sont installés sur des deux faces. Une jauge longitudinale et une jauge transversale de déformation sont présentes sur l'autre face des éprouvettes vierges (largeur 20mm). Neuf thermocouples sont installés sur l'éprouvette après impact (largeur 45mm).

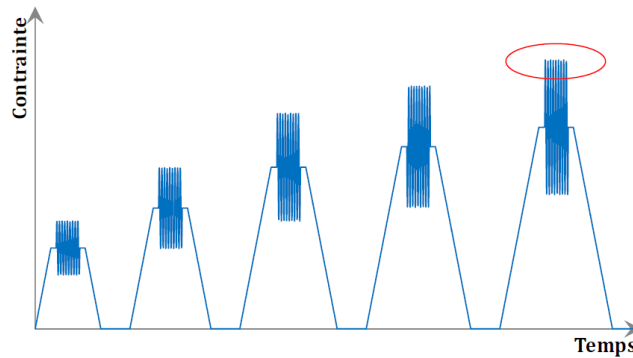


Fig 7. Déroulement des cycles d'un essai d'auto-échauffement

5. Limites de fatigue obtenues par les essais d'auto-échauffement

Les essais d'auto-échauffement étant effectués à fréquence et rapport de charge constant, l'amplitude mécanique des sollicitations croît de palier en palier. Il est donc attendu que l'amplitude de la réponse thermique augmente de manière proportionnelle tant que le comportement du matériau reste dans le domaine élastique [4]. On peut également décider d'expertiser la pente initiale ou la température maximale atteinte sur le bloc de chargement. Ces différents indicateurs peuvent être utilisés pour construire la courbe d'auto échauffement (Fig. 8). Dans la suite les résultats issus de la température maximale atteinte au pic sont présentés. Les deux approches conduisent à des résultats similaires. Dans le cas du matériau HCP 482 époxy LY 556, impacté ou non impacté les températures n'atteignent pas la tangente horizontale sauf sur les premiers blocs. Les défauts présents dans le matériau initial conduisent à emmagasiner des poches d'aires qui modifient fortement les propriétés thermiques du matériau. Ce phénomène n'a pas été constaté pour un matériau ne comportant pas de défauts initiaux.

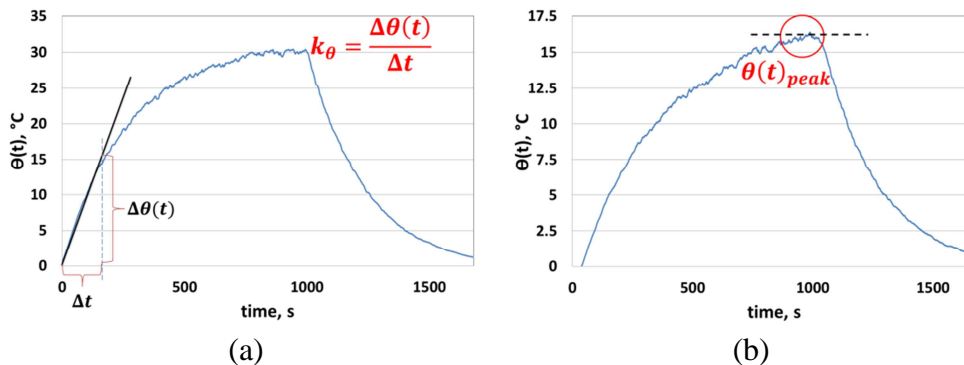


Fig 8. Evolution de la température lors d'un bloc de chargement. Les indicateurs possibles sont la température du pic (a), (b) la pente initiale ou la température stabilisée.

5.1 Analyse des essais d'auto-échauffement limites de fatigue sens chaîne

L'évolution de la variation de température définie comme la température maximale du bloc de chaque cycle et la température initiale ambiante en fonction du niveau de contrainte maximale appliqué à chaque palier met en évidence un changement de comportement thermique autour de 265 MPa (Fig 5). La limite de fatigue de l'éprouvette vierge dans le sens chaîne est postulée égale à 265 MPa. Un second changement apparaît pour 310 MPa. La limite de fatigue est cohérente avec celle obtenue à partir d'essais de fatigue. Dans le cas de l'éprouvette impactée à 20 J, trois zones géographiques sont répertoriées. Les évolutions des températures moyennes sur les zones MD (zone1), LD (zone 2), TB (zone3) sont présentées sur la figure 5. La courbe d'auto échauffement peut être construite sur chacune des zones. La courbe issue de la zone MD (zone1) nous donne une limite de fatigue de 152 MPa. Les courbes d'auto échauffement construites à partir des zones 2 et 3

donnent respectivement 152 MPa et 155 MPa. Les courbes d'auto échauffement des différentes zones ont été construites à partir de la température maximum atteinte sur chaque palier. En effet pour ce matériau, la réponse thermique n'atteint pas la tangente horizontale stabilisée. L'utilisation d'une fréquence de sollicitation fixe (5htz) et des retours à la température ambiante entre chaque bloc de cycles permet de construire un indicateur fiable d'endommagement basé sur la réponse thermique.

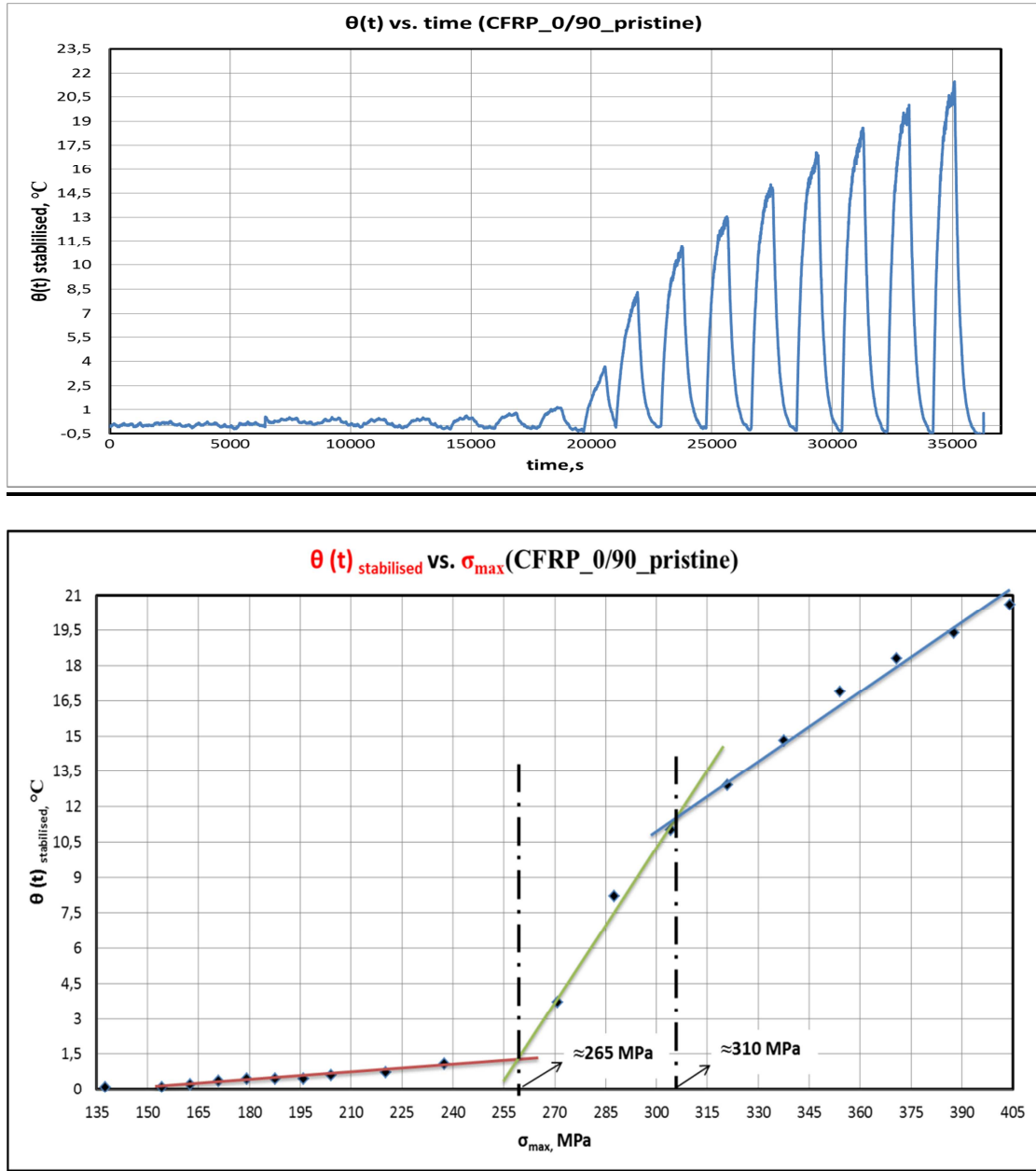


Fig 9. Variation de la température de l'éprouvette sens chaîne. Courbe d'auto-échauffement d'un tissu sens chaîne. Déduction de la limite d'endurance (de fatigue 265 MPa).

5.2 Analyse des essais d'auto-échauffement sur les éprouvettes impactées sens chaîne

Dans le cas de matériaux composites impactés, les mécanismes dissipatifs peuvent être supposés différents de ceux de l'éprouvette vierge, par exemple un couplage entre les mécanismes d'endommagement intralaminaires et interlaminaires peut apparaître. Des délaminages dus à l'impact

peuvent également progresser lors des essais de fatigue. Lors d'essais de fatigue en compression les délaminages progressent facilement en mode I, par contre sous des sollicitations de fatigue de traction les délaminages progressent plutôt mode II donc plus difficilement. Le dépouillement de la limite de fatigue issue des essais d'auto échauffement doit être revisité pour les éprouvettes comportant un gradient spatial initial de propriétés mécaniques. Les essais sont réalisés sur une éprouvette qui est considérée comme une structure. L'objectif à terme est de chercher à extraire des données matériaux depuis cette structure fortement hétérogène décrites par trois zones différentes (fig. 10). Les évolutions des températures moyennes lors des blocs de 4000 cycles sur les zones (zone 1, MD), (zone 2, LD), (zone 3, TB) sont présentées sur la figure 9. Dans le cas des éprouvettes sens chaîne les différentes zones ont un emballement de la température qui apparaît pour un niveau de contrainte identique. La courbe d'auto-échauffement est présentée sur la figure 10. La limite d'endurance de l'éprouvette dans le sens chaîne après avoir été impactée à 20 J avec une masse de 5.2 Kg est de 152 MPa (Fig. 12). Pour mémoire la limite de fatigue de l'éprouvette sens chaîne sans impact est de 256 MPa (Fig. 9).

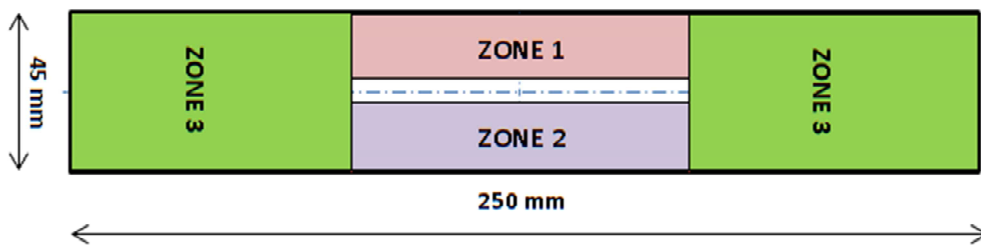


Fig 10. Choix des zones permettant de définir des températures moyennes par zones.

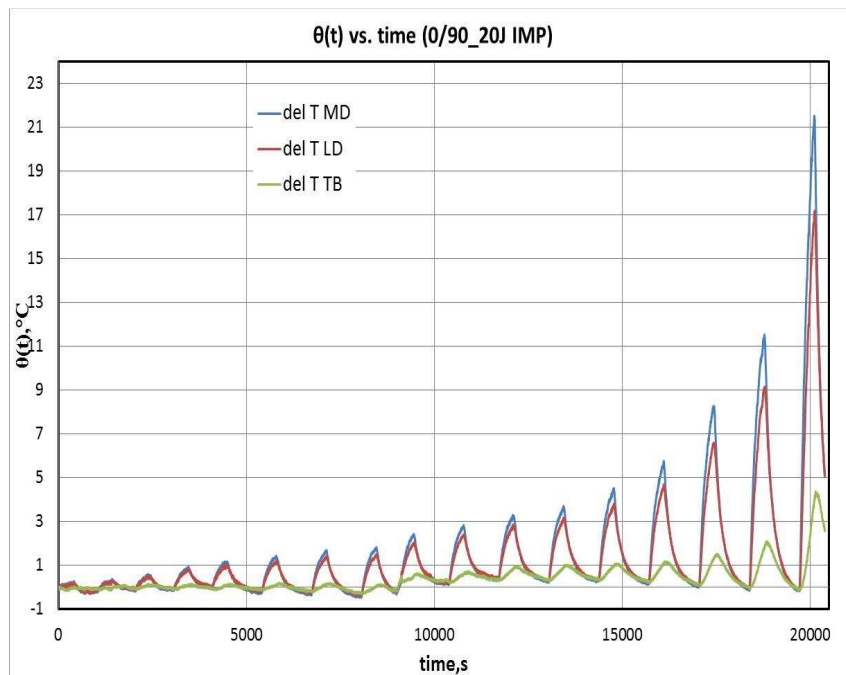


Fig 11. Evolution de la température lors d'un essai d'Auto-échauffement d'une éprouvette composite carbone / époxy tissée 0-90 HCP 482 / LY 556 impactée à 20J. Evolution des températures moyennes sur les zones MD (zone1), LD (zone 2), TB (zone3).

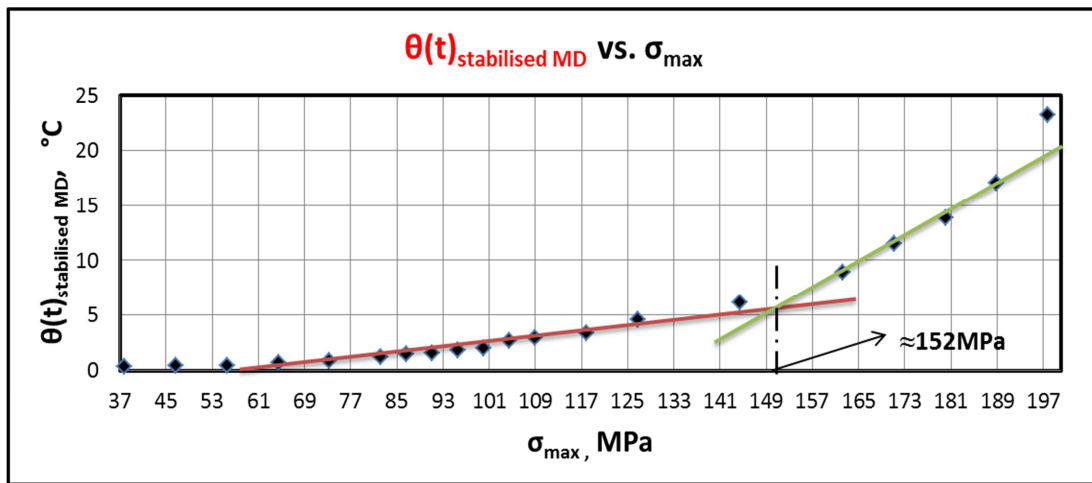


Fig 12. Courbe d'Auto-échauffement d'une éprouvette composite carbone / époxy tissée 0-90 HCP 482 / LY 556 impactée à 20J construite à partir de la zone. MD (zone1). La limite de fatigue est de 152 MPa.

6. Limites de fatigue estimées par les courbes de Wöhler

Les valeurs des limites d'endurance du tissu sens chaîne issus des essais d'auto-échauffement ont été vérifiées à l'aide d'essais classiques de fatigue. Traditionnellement, on détermine la limite de fatigue d'un matériau en construisant la courbe de fatigue (ou courbe S-N) du matériau et en étudiant le comportement asymptotique de la courbe à grand nombre de cycle. Des essais de fatigue sous différentes amplitudes de contrainte ont permis de représenter graphique la contrainte maximale versus le nombre de cycle à rupture (S-N) pour chaque stratification à R=0.1. La Fig. 13 présente les premiers points expérimentaux des éprouvettes sens chaîne. Une exploitation de ces résultats d'essais (Fig. 9) a permis d'estimer une limite de fatigue de l'ordre de $\sigma_{11} = 300 \text{ MPa}$. Il convient de noter que les essais traditionnels sens chaîne sont assez dispersé et que l'essai d'auto-échauffement (Fig. 10) pouvait être interprété comme une borne basse de fatigue à 265 MPa et une borne haute à 310 MPa. En conclusion les premiers essais de fatigue confirment les résultats issus des courbes d'auto-échauffement. L'essai d'auto-échauffement n'est généralement pas sensible aux imperfections du matériau, en conséquence, la limite de fatigue obtenue peut être considérée équivalente à la limite de fatigue la moyenne obtenue par des essais traditionnels. Nous supposons donc que la limite de fatigue se trouve entre les deux premiers mécanismes dissipatifs (Fig. 9).

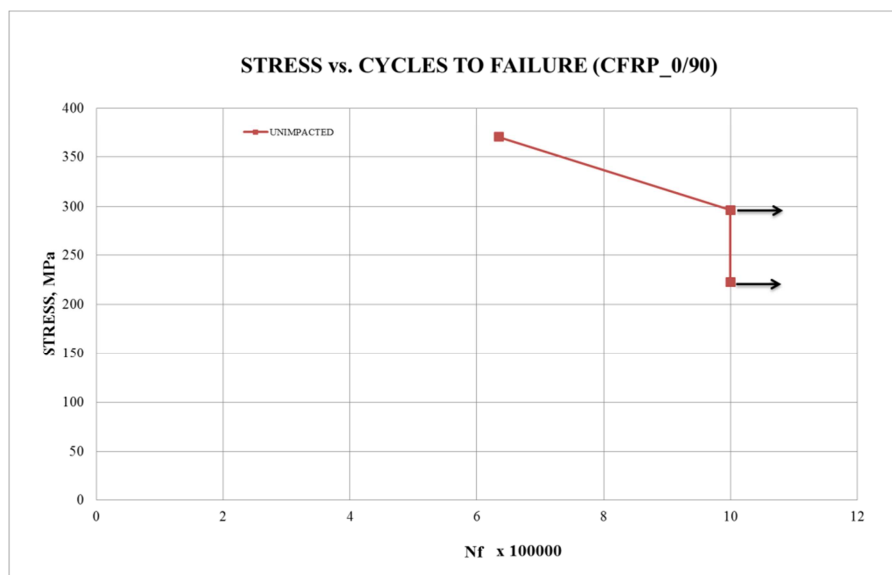


Fig 13. Début de courbe S-N d'un tissé sens chaîne (unités : Contrainte max nombre de cycles à rupture).

7. Conclusion

L'amélioration de la compréhension du comportement mécanique en fatigue à grand nombre de cycles des matériaux composites carbone époxy tissés comprenant des défauts initiaux est un problème complexe. La limite de fatigue dans les sens chaîne d'un tissu composite carbone époxy impactées a été déterminée à partir d'essais d'auto-échauffement. L'analyse des mécanismes de dégradation nous a conduit à proposer un dépouillement simplifié des essais d'auto-échauffement par zone. Chacune des zones étant associées à un état d'endommagement initial différent, une expertise des différentes zones était nécessaire. Il convient de noter que l'emballement thermique des zones se produit pour un état de contraintes proches. On peut ainsi définir des moyennes et un écart type de la limite de fatigue. La limite d'endurance à 10^6 cycles déterminée à partir de la courbe de Wöhler est en accord avec celle issue de la méthode d'auto-échauffement. La détection des signatures thermiques des mécanismes intralaminaires et interlaminaires demeure le point essentiel pour pouvoir utiliser la méthode d'auto-échauffement dans le cas des éprouvettes impactées sensibles aux mécanismes de délaminage. La caractérisation de la limite d'endurance en traction et en compression de matériaux composites impactés par une méthode rapide dite d'auto-échauffement demeure un problème ouvert dans les cas complexes mêlant différents mécanismes de dégradation conduisant à différentes sources de dissipations.

Références

- [1] LUONG MP, DANG VAN K., « Infrared thermographic evaluation of fatigue limit in metals », *27th QIRT Eurotherm Seminar*, Paris (France), 1992.
- [2] J.-C. KRAPEZ, D. PACOU, C. BERTIN, Application of lock-in thermography to rapid evaluation of fatigue limit in metals". 5th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications (AITA), Venice, Italy, September 28-30, 379–385, 1999.
- [3] G. LA ROSA, A. RISITANO, « Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components ». *International Journal of Fatigue*, Vol. 22, pp. 65-73, 2000.
- [4] DOUDAR C., PONCELET M., CALLOCH S., BOUE, C., HILD F. et GALTIER, A. Determination of an HCF criterion by thermal measurements under biaxial cyclic loading". *International Journal of Fatigue*, 29, 4, 748-757, 2007.
- [5] L. GORNET, O. WESTPHAL, M. MATEOS, A. KRASNOBRIZHA, P. ROZYCKI, T. JOLLIVET, F. LEFEBVRE, « Effet de la vitesse de chargement sur le comportement mécanique statique et sur la limite de fatigue d'un Tissu carbone/PA66 », *Jst, Onera*, Nov 2014.
- [6] M. MATEOS, L. GORNET, P. ROZYCKI, L. ARETXABALETA, « Hysteretic shear behavior of fibre-reinforced composite laminates », *16th European Conference on Composite Materials, Sevilla, Spain, June 23-27, 2014*.
- [7] A. KRASNOBRIZHA, P. ROZYCKI, P. COSSON, L. GORNET, « Modélisation du comportement des matériaux composites avec un modèle élastoplastique endommageable à dérivées fractionnaires », *JNC 19 Lyon*, 2015.
- [8] K.B. OLDDHAM, J. SPANIER, « *The fractional calculus* », Academic Press, New York and London, 1974.
- [9] S. MARGUET, P. ROZYCKI, L. GORNET, « A rate dependent constitutive model for carbon-fiber reinforced plastic woven fabrics », *Journal Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 14, 2007, pp. 619-631.
- [10] C. HOCHARD, P.A. AUBOURG, J.P. CHARLES, « Modelling of the mechanical behavior of woven-fabric CFRP laminates up to failure », *Composites Science and Technology*, 61, 2001, pp. 221-230.
- [11] L. GORNET, O. WESTPHAL, C. BURTIN, J.-L. BAILLEUL, P. ROZYCKI et L. STAINIER, Rapid Determination of the High Cycle Fatigue Limit Curve of Carbon Fiber Epoxy Matrix Composite Laminates by Thermography Methodology: Tests and Finite Element Simulations, *Procedia Engineering* 66, 697-704, 2013.
- [12] A ELIAS, F LAURIN, M KAMINSKI, L GORNET, Experimental and numerical investigations of low energy/velocity impact damage generated in 3D woven composite with polymer matrix, *Composite Structures*, 159, 228-239, 2016.