

Fatigue avec suivi acoustique de trois composites, verre Ud, verre sergé et aramide à matrice époxyde

Fatigue with acoustic tracking of three composites, Ud glass, twill glass and epoxy matrix aramid

Younès Menail^{1*}, Bachir Redjel², Abderahim El Mahi³, Rechid Berbaoui³ & Mohamed Assarar⁴

¹LR3MI, Dépt. de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.

²Dépt. Génie Civil, Laboratoire Génie Civil (LGC) Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.

³LAUM, UMR CNRS 6613, Université du Maine, av. O. Messiaen, 72085 Le Mans, France.

⁴Université de Reims Champagne Ardenne, CRESPI, EA 4301, IUT de Troyes, 9 rue de Québec BP 396 10026 Troyes Cedex, France.

Info. Article

Historique de l'article

Soumis le 15/09/2019

Révisé le 11/02/2020

Accepté le 29/02/2020

Mots-clés

Acoustique, aramide, verre, époxy, fatigue, traction

Key words

Acoustics, aramid, glass, epoxy, fatigue, traction

RESUME

L'objectif de cet article est de synthétiser une étude comparative de l'effet de la fatigue en traction sur trois composites à base de fibres de verre unidirectionnelles, fibres de verre sergés et en fibres d'aramide taffetas et de résine époxyde. Pour mieux comprendre les différents phénomènes qui apparaissent durant les différents essais, nous avons opté pour un suivi acoustique en faisant varier les nombres de cycles de fatigue de 100 à 50000. A cet effet, nous avons utilisé trois capteurs externes piézoélectriques reliés à trois amplificateurs de signaux, le tout relié à un système d'acquisition informatique. L'outil acoustique nous a permis de comparer plus facilement les effets de la fatigue sur les trois matériaux. Il nous a permis de détecter en direct les différents types d'endommagements occasionnés par la fatigue (fissuration matricielle, délaminage, décohésion et rupture des fibres). Les résultats de cette étude mettent en évidence les effets de la fatigue sur les trois matériaux, qui se manifestent par une diminution systématique des caractéristiques à la rupture de ces derniers, progressivement en fonction de l'augmentation des nombres de cycles. Il s'avère aussi que les matériaux à fibres de verre sont moins résistants que ceux à fibres d'aramide.

ABSTRACT

The objective of this paper is to synthesize a comparative study of the effect of tensile fatigue on three composites based on unidirectional glass fibers, twisted glass fibers and aramid taffeta fibers and epoxy resin. To better understand the different phenomena that appear during the different tests, we opted for acoustic monitoring by varying the number of fatigue cycles from 100 to 50,000. For this purpose, we used three external piezoelectric sensors connected to three signal amplifiers, all connected to a computer acquisition system. The acoustic tool allowed us to compare more easily the effects of fatigue on the three materials. It allowed us to detect on-line the different types of damage caused by fatigue (matrix cracking, delamination, decohesion and fibre breakage). The results of this study highlight the effects of fatigue on the three materials, which are manifested by a systematic decrease in their fracture characteristics, progressively as the number of cycles increases. It also appears that glass fibre materials are less resistant than aramid fibre materials.

* Auteur Correspondant

Younès Menail

Dépt. de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar

BP 12, Annaba, 23000, Algérie.

Email: menailyounes43@gmail.com

1. INTRODUCTION

Les matériaux composites s'imposent comme étant les matériaux du siècle, de par leurs caractéristiques mécaniques très performantes, leur légèreté et leurs coûts de plus en plus abordables, en fonction de la grande consommation et de la maîtrise de leur mise en œuvre. Ils occupent de très vastes domaines : l'aérospatiale, l'aéronautique, la construction automobile, les transports [1], la construction navale, le secteur pétrochimique, le génie civil, etc. Le rôle des renforts est déterminant et reste spécifique, en fonction de l'usage du matériau et des caractéristiques de ces derniers. Les fibres d'aramide et de carbone, en raison de leurs propriétés spécifiques et de leurs coûts relativement élevés restent d'un usage réservé à des domaines de pointe. Quant aux fibres de verre sous ses différentes formes, elles sont les plus utilisées compte tenu de leur rapport qualité prix. Le choix du matériau et de ses composants en fonction de son usage, de sa durée de vie [2, 3], de son coût, de son mode d'obtention, a poussé les chercheurs à optimiser au maximum les performances de ce dernier par des simulations et des recherches pratiques in situ.

Notre contribution d'essai de fatigue en traction de trois matériaux composites est un travail pratique destructif sous surveillance acoustique. Elle consiste à solliciter ces différents composites pour déterminer leurs résistances à l'effort et ensuite mener une comparaison entre eux pour déterminer le matériau le plus résistant [4]. L'outil acoustique, quant à lui, est utilisé pour mettre en relief les différents endommagements (fissure de matrice, délaminage, décohésion et rupture de fibres) subits par les différents matériaux [27-30]. L'essai de fatigue en traction se manifeste par des vibrations de surface sous forme d'ondes sinusoïdales élastiques qui sont amplifiées et recueillies par trois capteurs piézo-électriques placés le long de l'éprouvette pour donner le signal d'émission acoustique.

Afin de bien comprendre comment se manifestent les différents endommagements, une approche quantitative de la technique d'émission acoustique a été développée par certains auteurs [5,6]. Pour cela, ils ont déterminé la relation entre l'événement résultant d'une source et le signal détecté par les capteurs acoustiques, reliés au matériau traité [7]. Nous nous sommes basés sur les travaux d'Åberg et Gudmundson [8] qui ont observé que les signaux acoustiques associés aux fissures de matrice correspondent à des signaux de basses fréquences, alors que ceux associés à la rupture de fibres présentent des fréquences plus élevées [9-16]. Ils ont classé les amplitudes en trois ou quatre groupes, de la plus faible à la plus forte, pour les associer à la fissuration des matrices, puis celles des décohésions et délaminages et enfin, la rupture des fibres. Sur la base de ses travaux, nous avons établi la carte acoustique donnée par le tableau 1.

Tableau 1 : Carte acoustique

N°	Mécanisme d'endommagement	Nb de dB correspondant
0	Seuil	0-40
1	Fissuration de la matrice	40-60
2	Délaminage interlaminaire	60-70
3	Décohésion	60-70
4	Rupture de fibres	70-90

METHODOLOGIE DE RECHERCHE

2.1. Matériaux

Les matériaux que nous avons utilisés sont à base de résine époxy de fibres de verre et de fibres d'aramide, tableau 2. Les plaques composites ont été élaborées par moulage au contact, sous vide, par la technique dite du "sac". Cette opération se fait sous une dépression de 0.3 bar pendant 6h, grâce à une pompe à vide, suivie d'une polymérisation de 8h à 80°C dans une étuve. Les éprouvettes sont découpées par la suite, aux dimensions préconisées (200x20x1) mm³, à l'aide d'un disque diamanté monté sur une tronçonneuse. Le taux massique de fibres des matériaux est déterminé par calcul et par perte au feu.

Tableau 2 : Matériaux de l'étude

Fibre	Tissage	densité [g/m ²]	Fraction massique [%]	Résine	Fournisseur	Dimensions [mm ³]	Plis	Poids [g]
Verre E	Sergé	300	65	Epoxy SR 1500 Durcisseur SD 2505	Sicom France	200x20x1	4	7.2
Verre E	Ud	300	67				4	7.2
Kevlar	Taffetas	170	42				6	4.3

2.2. Essais de fatigue

Les essais de fatigue en traction ont été réalisés sur une machine hydraulique universelle de marque INSTRON modèle 8516 équipée d'une cellule de force de 100 kN, représentée par la figure 1.

Le pilotage et l'acquisition des données sont faits par ordinateur pour enregistrer l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation. Les essais sont réalisés à température ambiante (15 à 25°C). La machine est pilotée à vitesse de traverse constante. Cette vitesse a été déterminée suite à une série d'essais préliminaires, qui a permis de la fixer à 1 mm/min pour tous les types d'échantillons. L'emploi d'une même vitesse, quel que soit le type d'essais, permet de s'affranchir de l'effet viscoélastique produit par les résines, lors de la comparaison de résultats provenant de différents essais.



Figure 1. Machine de fatigue et système d'acquisition acoustique

2.3. Suivi par émission acoustique

Le suivi acoustique est d'un apport très précieux, puisqu'il nous permet de bien visualiser les différents endommagements subits par les différents matériaux. Trois capteurs piézoélectriques sont disposés le long de l'éprouvette et sont reliés à des amplificateurs. Pour l'analyse acoustique, nous avons utilisé un système d'acquisition (EPA) composé de trois voies pour une fréquence d'échantillonnage de 5Hz. La liaison entre l'ordinateur et le système est faite grâce à une carte d'acquisition PCI. Les signaux d'émission acoustique sont enregistrés par 3 capteurs différentiels piézoélectriques de type Micro-80, de bande passante 100 kHz – 1 MHz. Cela se fait après une amplification avec un gain de 40 dB. La carte PCI va ensuite convertir les signaux et les numériser. Suite à ça ils seront exploitables. Le suivi et l'acquisition des données acoustiques se font en parallèle avec les essais mécaniques, grâce à un autre logiciel et à un autre ordinateur. Le système d'acquisition doit être calibré avant usage, grâce à un casse mine, afin de déterminer le seuil de sécurité, pour éviter les bruits parasites [17-21].

3. ANALYSES ET RESULTATS

3.1. Effets de la fatigue

Pour cerner l'effet de la fatigue sur le matériau, nous avons opté pour une série de nombres de cycles comprise entre 100 et 50 000 cycles. La figure 2 donne une idée sur l'évolution de la fatigue des composites kevlar et verre. Pour bien comprendre l'apparition des différents types de dégradations, il faut savoir que l'éprouvette subit un chargement égal à 50% du déplacement à la rupture en statique. Puis commence une fatigue sous une fréquence de 10Hz, pour une amplitude de 10% du déplacement à la rupture (tableaux 3 et 4).

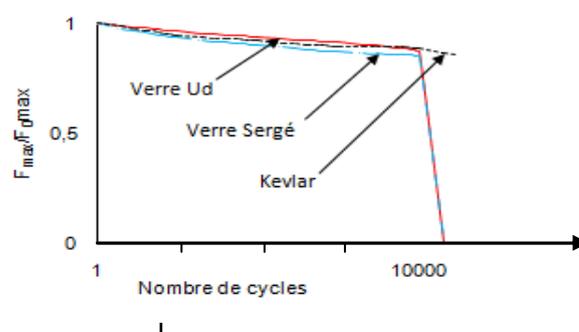


Figure 2. Courbes de fatigue des trois matériaux de l'étude

Il est très facile de distinguer les effets des deux opérations de chargement et de fatigue. La première opération se manifeste dès le départ par une rupture de matrice suivi par un délaminage puis d'une rupture de fibres, sur un temps très court qui correspond à la charge brusque de l'éprouvette. Puis commence la fatigue qui se manifeste par une rupture de matrice, tout le long de l'opération. Le délaminage est très faible et la rupture de fibres est très rare. Suite à ces résultats, nous pouvons dire que le matériau résiste mal aux efforts brusques et s'adapte mieux à une fatigue longue et constante.

Tableau 3: Données expérimentales

Fibre	Force rupture [N]	Déformation rupture [mm]	Amplitude [mm]	Vitesse [mm/mn]	f [Hz]	Nb cycles
Verre sergé	8000	1.76	0.35	1	10	100 à 50000
Verre Ud	10190	1,94	0,4			

Tableau 4 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres

Fibre	Vitesse [mm/mn]	σ [MPa]	ε [%]	E_L [GPa]	E_T [GPa]
Verre sergé	1	380	3.54	16	16
Verre Ud		438	3,88	18,05	-
Kevlar		305	2.67	16.5	16.5

Ces essais sont menés en contrôlant le déplacement. Le déplacement moyen étant maintenu constant. Au cours de ces essais, nous avons enregistré l'évolution de la charge maximale F_{max} en fonction du nombre de cycles N . La figure 2 montre les résultats obtenus dans le cas d'un essai de fatigue des trois matériaux. Elle représente l'évolution du rapport en fonction du nombre de cycles de fatigue (F_{0max} est la charge maximale obtenue au premier cycle). Les résultats obtenus montrent que la perte de rigidité (mesurée par le rapport F_{max}/F_{0max}) jusqu'à la rupture de l'éprouvette se déroule en trois phases (Fig. 3):

- Dans un premier temps, elle se manifeste par une diminution brutale du rapport F_{max}/F_{0max} dès les premiers cycles (Fig. 3a),
- La diminution devient ensuite très lente dans la deuxième phase, correspondant à la quasi-totalité de la durée de vie de l'éprouvette (Fig. 3b).
- Et enfin, dans la troisième phase, très courte où la perte de rigidité s'accélère brutalement jusqu'à la rupture de l'éprouvette (Fig. 3c).

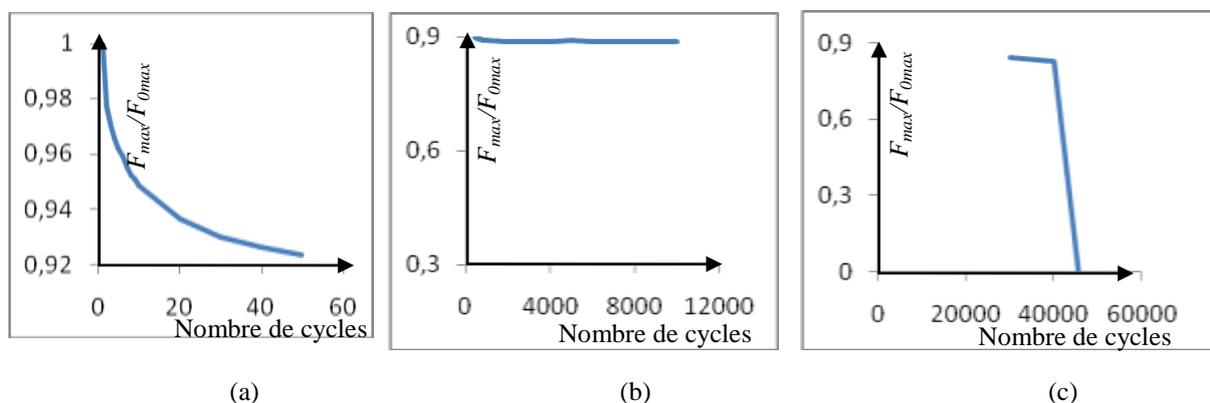


Figure 3 : Différentes étapes de dégradation des matériaux; (a) Etape de rupture de la matrice, (b) Etape de délaminage, (c) Etape de rupture de fibres

Les trois parties distinctes de la courbe peuvent être attribuées à:

- l'initiation et la multiplication de la fissuration transverse dans la résine pour la première partie,
- la propagation stable de celle-ci, ainsi que l'initiation du délaminage durant la deuxième partie,
- et enfin l'accumulation de la fissuration entraînant le délaminage des couches et la rupture des fibres provoquant ainsi la rupture finale de l'éprouvette pour la dernière partie.

Les travaux de Talreja [22] repris par Muc [23], expliquent l'évolution de l'endommagement en 3 stades par : le premier stade correspond à la rupture (effondrement) de la matrice, le deuxième correspond au délaminage et enfin dans le troisième stade correspond à la rupture des fibres. Il est à noter que la première phase ne constitue que 10% de la durée de vie alors qu'elle correspond à 80% du taux d'endommagement. Les éprouvettes en verre se sont rompues avant d'atteindre les 50000 cycles, alors que la rupture de l'éprouvette en kevlar n'est pas atteinte au bout d'un million de cycles.

3.2. Suivi par émission acoustique

Les trois capteurs, grâce aux amplificateurs nous permettent de visualiser l'effet de la fatigue en traction sur les trois matériaux composites. Les résultats sont affichés sur l'écran après le traitement de l'information, grâce à un logiciel spécialisé. Les différents types d'informations nous permettent de suivre en direct l'évolution de la dégradation des matériaux. La figure 4 nous permet de suivre la dégradation des matériaux, matérialisés par des points qui apparaissent aux niveaux des trois capteurs, dessinés sur l'éprouvette.

Quand à la figure 5, elle montre le nombre de salves qui correspondent aux différents types de dégradations. Lorsqu'un endommagement a lieu à l'intérieur du matériau, ce dernier émet une onde élastique qui sera capté par le capteur lorsqu'elle atteint la surface du matériau. L'onde est ensuite convertie en signal électrique avant d'être analysée par un système de traitement de données. Le nombre de salves par types d'endommagement nous donne une idée sur l'importance des différentes dégradations, les unes par rapport aux autres. Le seuil de 40 décibels est fixé comme étant une amplitude de sécurité, pour éviter de tenir compte des différents bruits générés par le milieu extérieur. Les résultats du tableau 5 nous permettent de décoder la figure 6.

Grâce à l'outil acoustique, la figure 6 nous permet de bien visualiser les différents types de dégradations des trois matériaux et de comprendre les différentes étapes par lesquelles doit passer chaque matériau avant sa rupture [24, 25, 26].

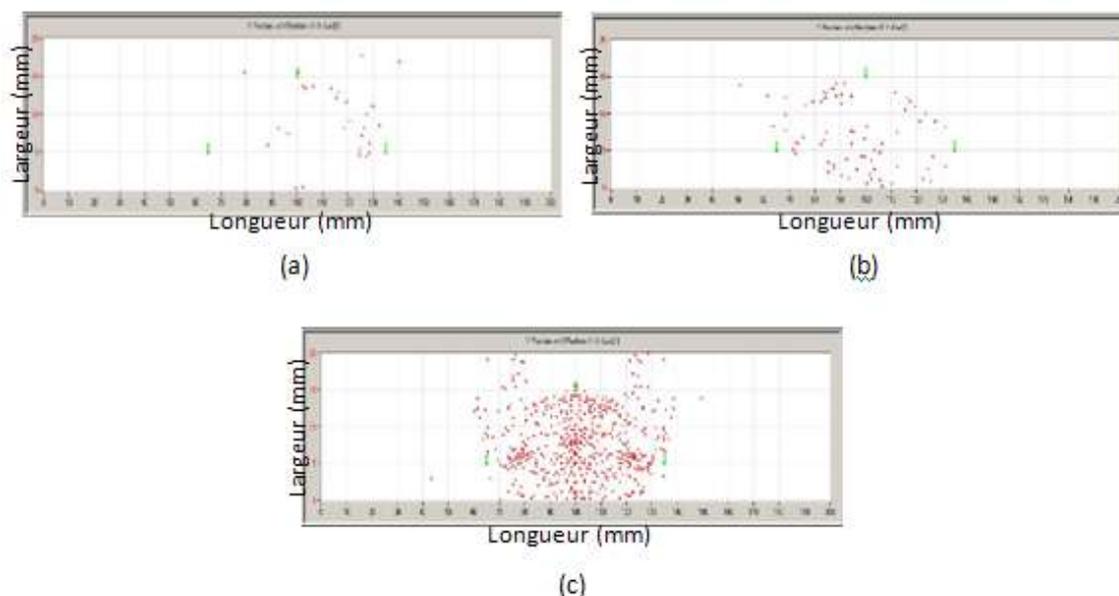


Figure : 4 Apparition des impacts de salves sur les éprouvettes avec disposition des capteurs
(a) Kevlar (b) verre sergé (c) verre Ud

Comparativement, les nombres de salves sont plus importants dans les éprouvettes en verre que dans l'éprouvette en Kevlar. Et il est plus important dans l'éprouvette en UD que dans l'éprouvette en sergé. Cela est dû à la texture de chaque tissu. L'éprouvette en Kevlar, de par sa nature et de par sa texture, est la moins riche en événements (Fig.6a). Nous pouvons dire, grâce aux données du tableau 5, qu'après le très court pic que subit le matériau, au début de sa sollicitation, où il y a rupture de matrice, délaminage et rupture de

fibres, il n'y a que rupture de matrice, durant toute la fatigue. Ce qui prouve que le matériau résiste bien à la fatigue.

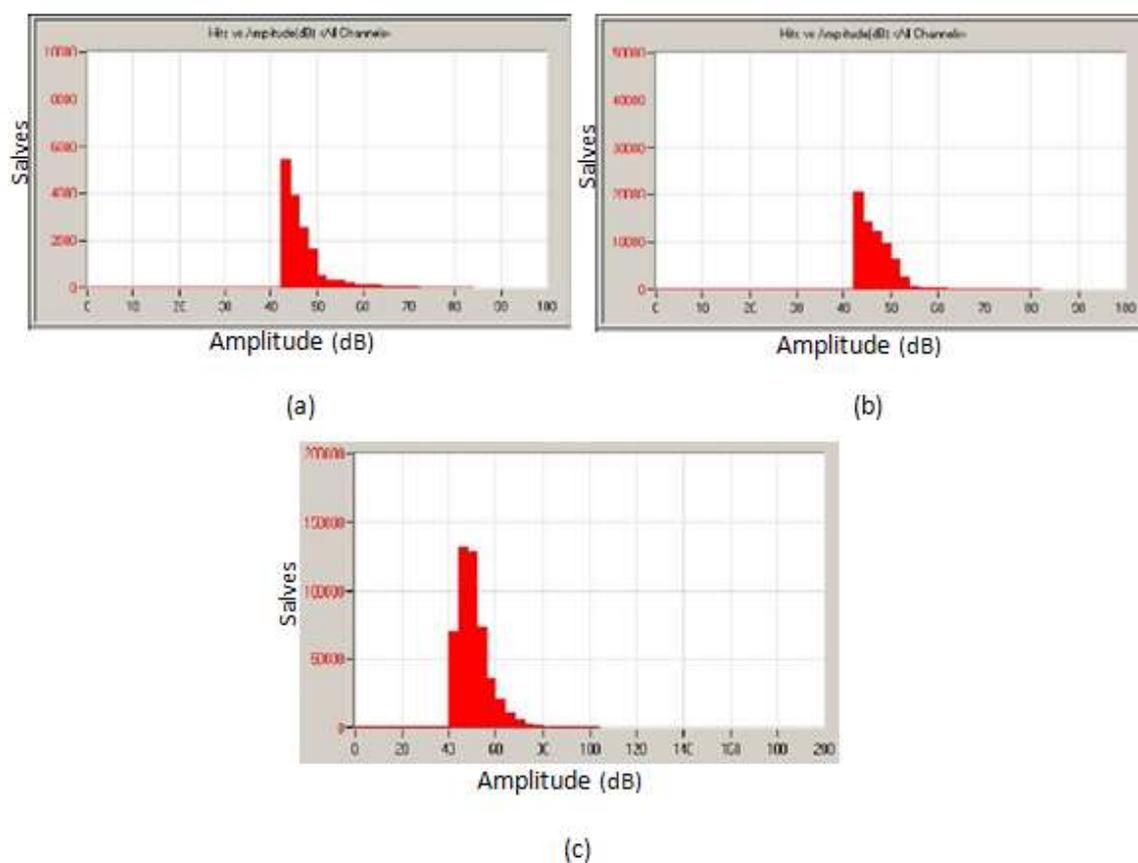


Figure 5. Répartition des nombres de salves par niveaux d'amplitudes

(a) Kevlar (b) verre sergé (c) verre Ud

(b)

- L'éprouvette en verre sergé (Fig. 6b), comparativement à celle de Kevlar présente les mêmes effets au début de la fatigue avec plus de décohésion et de délaminage durant le cycle de fatigue.
- L'éprouvette en verre Ud (Fig. 6c), est l'éprouvette qui présente tous les types de sollicitations depuis le début jusqu'à la fin. Cela est dû à la nature et à la texture du matériau.

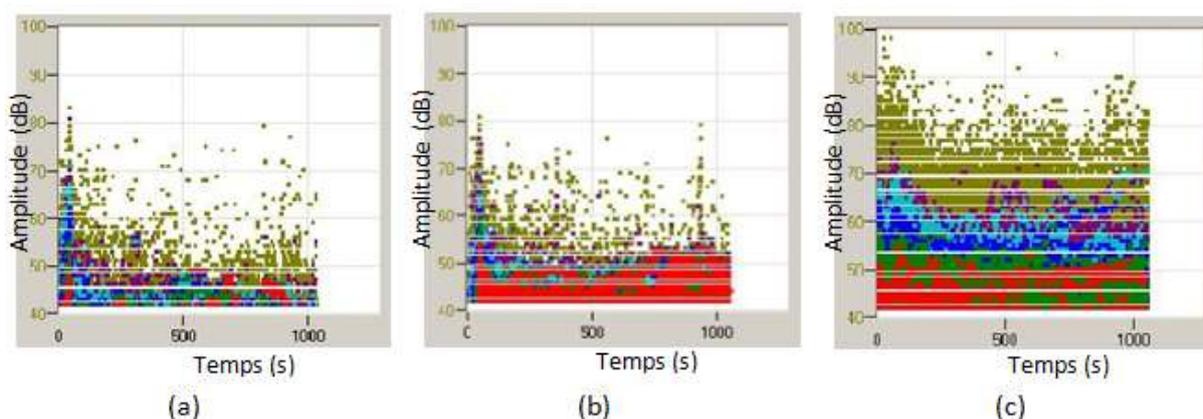


Figure 6. Rupture après 10000 cycles de fatigue

(a) Kevlar K (b) verre sergé (c) verre Ud

4. CONCLUSION

La fatigue des matériaux quelque soit leur nature présentent le même profil de sollicitation. L'évolution de l'endommagement de ces matériaux est mise en relief par les travaux de Talreja puis par Muc. La résistance du matériau dépend de sa nature et de sa texture. L'éprouvette Kevlar et l'éprouvette verre sergé de nature différentes et à dimensions égales et à texture presque identiques ne présentent pas le même profil de fatigue.

L'éprouvette verre Ud et l'éprouvette verre sergé à nature identique, à dimensions égales et à texture différentes ne présentent pas le même profil de fatigue. Cela nous permet de dire que l'évolution de la dégradation d'un matériau (rupture de matrice, délaminage, décohésion et rupture de fibres) en fonction de la fatigue est révélatrice du comportement de ce dernier et de ses caractéristiques. Cette dégradation dépend de sa nature et de sa texture. D'où l'intérêt du choix du matériau pour la réalisation de pièces en fonction de leur usage. L'outil acoustique nous a permis de mettre en relief la résistance du Kevlar par rapport au verre sergé et au verre Ud (figure 2).

REFERENCES

- [1] Odru P., Dewimille B., Grosjean F. et Huvey M., 1996. Canalisation composites pour applications pétrolières marines : les problèmes de durabilité. Journées Scientifiques et Techniques AMAC. Moret sur Loing 30-31. France.
- [2] Talreja R, 1981. "Fatigue of composite materials: damage mechanisms and fatigue-life Diagrams". Proceedings of Royal Society London, A378, pp 461-475.
- [3] Gaumet S., N. Siampiringue and J. Lemaire, 1996. "Durabilité des matériaux composites. Comment réaliser un photovieillissement accéléré fiable. Un exemple précis : la résine époxy (DGEBA)". Annale des composites, AMAC, France, pp. 85-90.
- [4] Benzeggagh M.-L., Barre S., Echalié B. et Jacquemet R. 1992. Etude de l'endommagement de matériaux composites à fibres courtes et à matrice thermoplastique. AMAC Journées Nationales Composites, Paris, France, vol. 8, pp.703-714.
- [5] Kline R. A., Green R. E. et Palmer C. H., 1981. Acoustic emission waveforms from cracking steel: experiment and theory. Journal of Applied Physics, Volume 52, p.141-146.
- [6] Wadley H. N. G., Scruby C.B. et Shrimpton, G., 1981. Quantitative acoustic emission source characterisation during low temperature cleavage and intergranular fracture. Acta Materialia, Volume 29, p. 399-414.
- [7] Ceausescu-Ersen E.A., 2004. Application de la technique d'émission acoustique à la caractérisation de matériaux céramiques évolutifs. Thèse de Doctorat en sciences. L'Université de Limoges, France. 150p.
- [8] Åberg M. et Gudmundson P., 2000. Micromechanical modeling of transient waves from matrix cracking and fiber fracture in laminated beams. International J. of Solids and Structures, Vol. 37, Issue 30, pp 4083-4102.
- [9] De Groot P. J., Wijnen P. A. M. et Janssen R. B., 1995. Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites. Composites Science and Technology, vol.55, pp. 405-412.
- [10] Chen O., Karandikar P., Takeda N. et Kishi T., 1992. Acoustic emission characterization of a glass-matrix composite. Non destructive Testing and Evaluation, vol.8-9, pp.869-878.
- [11] Kim S.-T. and LEE Y.-T., 1997. Characteristics of damage and fracture process of carbon fiber reinforced plastic under loading-unloading test by using AE method. Materials Science and Engineering, Vol. A234-236, pp.322-326.
- [12] Karger-Kocsis J., Harmia T. et Czigany T., 1995. Comparison of the fracture and failure behavior of polypropylene composites reinforced by long glass fibers and by glass mats. Composites Science and Technology, vol.54, pp.287-298.
- [13] Kotsikos G., Evans J. T., Gibson A. G. and Hale J., 1999. Use of acoustic emission to characterize corrosion fatigue damage accumulation in glass fiber reinforced polyester laminates. Polymer Composites, Vol. 20, n°5, pp. 689-696.
- [14] Kotsikos G., Evans J. T., Gibson A. G. and Hale J., 2000. Environmentally enhanced fatigue damage in glass fiber reinforced composites characterised by acoustic emission. Composites: Part A, Vol. 31, pp.969-977.
- [15] Swindlehurst W. E. and Engel C., 1978. A model for acoustic emission generation in composite materials. Fibre Science and Technology, Volume 11, Issue 6, p. 463-479.
- [16] Barre S., Benzeggagh M.-L., 1994. On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fiber-reinforced polypropylene. Composites Science and Technology. Vol. 52, pp.369-376.
- [17] Nielsen A., 1980. Acoustic emission source based on pencil lead breaking. The Danish Welding Institute Publication. vol. 80, p. 15-20.
- [18] Bentahar M., 2005. Acoustique non-linéaire : Application à la caractérisation ultrasonore de l'endommagement des matériaux hétérogènes et à la prédiction de la durée de vie". Thèse de doctorat en sciences appliquées de L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. France. 124p.
- [19] Huguet S., 2002. Application de classificateurs aux données d'émission acoustique : identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polymère", Thèse de doctorat en sciences appliquées de L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. France. 130p.

- [20] Nechad H., 2004. Evaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : Estimation de la durée de vie restante, Thèse de doctorat en sciences appliquées de L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. France. 154p.
- [21] Marec A, Thomas J-H, El Guerjouma R., 2008. Damage characterization of polymerbased composite materials: multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data. *Mech Syst Signal Proc*; 22:1441–64.
- [22] Talreja R., 1990. *Fatigue of composite materials: Analysis, Testing and Design*’ Siminar, Technomic publishing Co Inc, Lancaster, Basel, Switzerland.
- [23] Muc, A. 2000. Design of composite structures under cyclic loads. *Computers and Structures*; 76:211-218.
- [24] Chen O., Karandikar P., Takeda N. and Kishi T., 1992. Acoustic emission characterization of a glass-matrix composite. *Non destructive Testing and Evaluation*, Vol. 8-9, pp.869-878.
- [25] Olexander Y., Mykola O., Serhiyenko M., Valentyn R. and Skalsky R., 2001. Analysis of acoustic emission caused by internal cracks". *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 68, Issue 11, p. 1317-1333.
- [26] Huguet S, Godin N, Gaertner R, Salmon L, Villard D., 2002. Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester. *Compos Sci Technol*; 62:1433–44.
- [27] El Mahi A., Ben Salem I., Assarar A., Berbaoui R., Poilane C. et El Guerjouma R., 2010. Analyse par émission acoustique de l'endommagement des matériaux éco-composites. 10^{ème} Congrès Français d'Acoustique, Lyon, France.
- [28] Roundi W., El Mahi A., El Gharad A. et Rebiere J. L., 2019. Evaluation des mécanismes d'endommagement dans les stratifiés verre/époxy par émission acoustique. *Comptes Rendus des JNC 21–Bordeaux INP France*.
- [29] Ngoc Tan Duong., 2015. Cartographie et caractérisation acoustiques des matériaux composites : application à l'évaluation du taux volumique de porosité dans un matériau composite RTM. *Matériaux*. Université du Havre, France. NNT : 2015LEHA0023.
- [30] Ben Ammar I., 2014. Contrôle de santé vibro-acoustique de l'endommagement des matériaux composites à base polymère pour l'aéronautique. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université du Maine, France. NNT : 2014LEMA1014.