



"Étude expérimentale du comportement en fatigue des composites verre/époxy évalué par la dégradation de la rigidité et l'accumulation des dommages"

Walid Roundi¹

Abderrahim El Mahi²

Abdellah El Gharad¹

Jean-Luc Rebière²

¹ " Laboratoire Marocain de l'Innovation et de la Performance Industrielle (LaMIPI)
Ecole Normale Supérieure de L'Enseignement Technique de Rabat (ENSET)
Université Mohammed V Rabat, Maroc
e-mail : roundi.walid@gmail.com "

² " Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine
(LAUM) UMR CNRS 6613 Le Mans Université du Maine, Av. Olivier Messiaen
72 085 Le Mans cedex 9, France "

Résumé :

Le présent travail porte sur l'étude du comportement mécanique des matériaux composites verre/époxy sous chargement cyclique. Les échantillons testés ont été réalisés selon différentes séquences d'empilement ($[0_2/90_2]_s$, $[90_2/0_2]_s$, $[0_3/90]_s$, $[90_3/0]_s$ avec la technique du moulage sous vide. Les essais de fatigue ont été effectués sous différents niveaux de chargement (r) afin d'évaluer l'effet de ce dernier sur la dégradation de la rigidité et l'évolution du facteur de dommage global (D) en fonction du nombre de cycles. Au cours des essais de fatigue nous avons enregistré l'évolution du déplacement maximum d_{max} rapporté à celui obtenu durant le premier cycle d_{0max} en fonction du nombre de cycles.

Mots Clés : Fatigue, Composite, Endommagement, Verre/Epoxy, Séquence d'empilement.

1. Introduction

Depuis quelques dizaines d'années, les applications des matériaux composites stratifiés s'étendent à des domaines de plus en plus variés, grâce à leurs performances très intéressantes. Dans ce sens les industries aérospatiales et aéronautiques expriment un intérêt croissant envers plusieurs types de matériaux composites, et notamment les verres/époxy vu leurs très bonnes résistances et rigidités spécifiques. Avec le développement de ces applications, les structures réalisées en matériaux composites sont appelées à devenir de forme de plus en plus complexe, et à répondre à des sollicitations elles aussi de plus en plus variées. La fiabilité et la durabilité de certaines de ces pièces maitresses peuvent être vitales pour l'ensemble du produit fabriqué. Les composites stratifiés verre / époxy sont hétérogènes et anisotropes, il est plus complexe de caractériser leur comportement mécanique par rapport aux matériaux métalliques. Le développement des dégradations dans un composite stratifié est un mécanisme complexe qui résulte de différents modes d'endommagements souvent concomitants et qui dépend de très nombreux paramètres. Dans cet objectif de nombreuses études expérimentales ont été réalisées en ce qui concerne les endommagements sous sollicitations monotones, servant de base à quelques modélisations. Par contre les résultats en fatigue sont à l'heure actuelle plus rare, alors qu'ils sont très utiles pour les structures aéronautiques ou spatiales. Plusieurs études ont montré que les dommages causés par la fatigue peuvent être évalués par la rigidité, la résistance résiduelle ou d'autres propriétés mécaniques [1-7]. El Mahi et al [8] montrent que le comportement en fatigue des matériaux composites est principalement dû au type du changement appliqué et à la perte de rigidité au cours des cycles. Muc [9] définit la rigidité résiduelle en fonction de la rigidité initiale, de niveau de la contrainte appliquée et la densité des fissurations de la matrice. Poursartip et al. [10] démontrent que la réduction de la rigidité pourrait être liée d'une manière linéaire aux «dommages» cumulés en raison des cycles de fatigue. Broutman [11] a proposé une théorie des dommages cumulatifs afin d'étudier le comportement en fatigue et la défaillance des composites renforcés par des fibres de verre. F.Wu et Plumtree [12, 13] ont étudié l'évolution des dommages dans un stratifié en polymère renforcé par des fibres de carbone $[\pm 45]_{2S}$ et dans des stratifiés en fibre de carbone pendant des essais de fatigue. Ils ont démontré que le comportement en fatigue de ces composites est principalement dû à l'évolution des dommages et à la dégradation de la rigidité qui permet la formation des fissures microscopiques conduisant à la rupture de ces matériaux. Cette étude porte alors sur la caractérisation du comportement mécanique des stratifiés verre / époxy évalué par la dégradation de la rigidité et l'accumulation des dommages. Grâce aux résultats obtenus une description du comportement cyclique de ces composites a été développée. Cette dernière consiste à modéliser l'évolution de la rigidité, ainsi le facteur d'endommagement en fonction du nombre de cycles par des fonctions simples dont les coefficients dépendent des différents paramètres caractérisant le comportement en fatigue du matériau. Au cours des essais de fatigue nous avons enregistré l'évolution du déplacement maximum d_{max} rapporté à celui obtenu dans le premier cycle d_{0max} en fonction du nombre de cycles. Cette évolution constitue l'une des méthodes les plus utilisées pour suivre la progression de l'endommagement par fatigue des composites.

2. Mise en œuvre

Les composites étudiés durant ce travail sont mis en œuvre en utilisant des fibres stratifiées avec des séquences d'empilement de $([0_2/90_2]_s; [90_2/0_2]_s; [90_3/0]_s; [0_3/90]_s)$. Les renforts sont constitués par des fibres de verre de densité surfacique de 300 g m^{-2} , la résine époxyde est de type SR1500. Les composites étudiés ont été réalisés par moulage sous vide, par la technique dite du "sac". Les différents plis sont positionnés manuellement selon la séquence désirée. Les couches sont imprégnées de résine à température ambiante à l'aide d'un rouleau ou d'un pinceau, puis moulées sous vide entre le moule et le contre moule après interposition de divers tissus de moulage. L'ensemble est placé dans un sac étanche, sous vide avec une dépression de 0,7 bar pendant 10 heures. La résine sera drainée jusqu'à l'extrémité du moule et aspirée vers les canaux de vide. La découpe des plaques selon la géométrie des éprouvettes est réalisée avec une tronçonneuse à disque diamanté. La fabrication de ces matériaux est réalisée au sein du laboratoire (LAUM). Le dosage utilisé est de 50% du taux de fibres de verre de densité 300 g/m^2 et de 50% du taux de résine époxyde de type SR1500. Les Tab. 1 et Tab. 2 présentent les propriétés mécaniques des fibres de verre et de la résine époxyde utilisées.

Tableau .1 Propriétés mécaniques de la fibre de verre

Fibre de verre	
Densité surfacique (g/m^2)	300
Contrainte à la rupture (MPa)	2500
Coefficient de Poisson	0,25
Déformation à la rupture (%)	4,8
Module de traction (GPa)	74
Module de cisaillement (GPa)	30

Tableau .2 Propriétés mécaniques de la résine

Résine époxyde	
Module de Young (MPa)	2900 à 3200
Résistance en traction (MPa)	74 à 77
Résistance en flexion (MPa)	115 à 120

3. Dispositif expérimental

Les essais sont effectués sur une machine d'essais hydraulique universelle de type INSTRON 8516 (Fig. 1), avec une capacité de 100 kN. La déformation transversale de l'éprouvette est mesurée à l'aide d'un capteur de déplacement (LVDT) et la charge est mesurée à l'aide d'une cellule de force. La déformation longitudinale est mesurée à l'aide d'un extensomètre. Le pilotage et l'acquisition se font par ordinateur. Les éprouvettes ont été testées sous température ambiante jusqu'à la rupture, avec un chargement de forme d'onde sinusoïdale avec une fréquence de 10Hz.

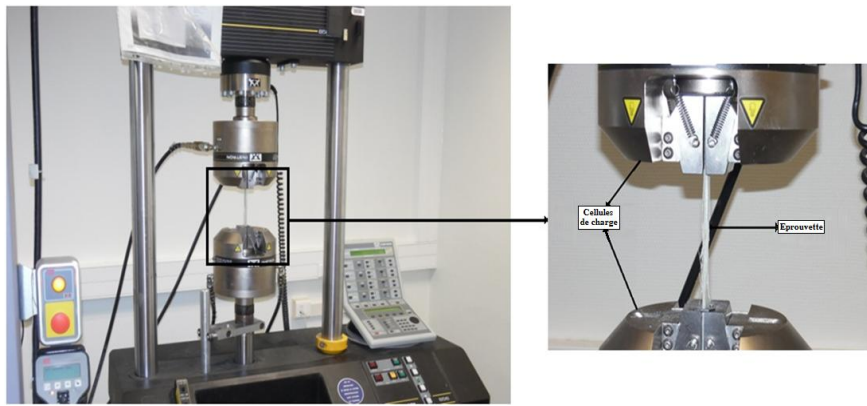


Figure 1. Dispositif expérimental

4. Résultats et discussions

4.1 Evolution de la rigidité

La rigidité est un paramètre qui peut être suivi et relié à la durée de vie en fatigue des matériaux. Plusieurs modèles analytiques sont développés pour relier la rigidité aux différents paramètres caractérisant le comportement en fatigue du matériau (le nombre de cycles, le niveau et rapport de chargement).

Hwang et al [14] ont proposé un modèle pour décrire le comportement des matériaux composites au cours des essais de fatigue. Ce modèle est basé sur une interpolation des résultats de quelques essais de fatigue par des fonctions simples. Ces fonctions dépendent du type de contrôle :

En contrôle de force : l'évolution du déplacement en fonction du nombre de cycles et du niveau de chargement est décrite par une fonction du type exponentiel, elle s'exprime par :

$$\frac{d_{0\max}}{d_{\max}} = e^{(-C_{0F} r^{CF} n)} \quad (1)$$

Où r est le niveau de chargement (F_{\max} / F_{rup}), C_F et C_{0F} dépendent du matériau et sont déterminés expérimentalement.

Nous avons reporté sur la Fig. 2 l'évolution du déplacement ($d_{0\max}/d_{\max}$) en fonction du nombre de cycles pour les quatre séquences d'empilement et sous différents niveaux de chargement r (0,6; 0,7; 0,8). Les résultats présentés montrent que la perte de rigidité (caractérisée par le rapport $d_{0\max} / d_{\max}$), jusqu'à la rupture de l'éprouvette se déroule en trois phases. Dès les premiers cycles, nous enregistrons une diminution rapide de la rigidité (phase I). Cette diminution devient ensuite très lente dans la deuxième phase et correspond à la quasi-totalité de la durée de vie de l'éprouvette. La troisième phase est caractérisée par une très courte durée, la perte de rigidité s'accélère brutalement jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Les trois phases de la courbe peuvent être associées à une initiation et une multiplication des microfissurations pour la première phase, une propagation des microfissures durant la deuxième phase qui constitue à peu près 90% de la durée de vie et enfin une propagation rapide de la fissure qui devient plus localisée entraînant la rupture de l'éprouvette pour la dernière phase.

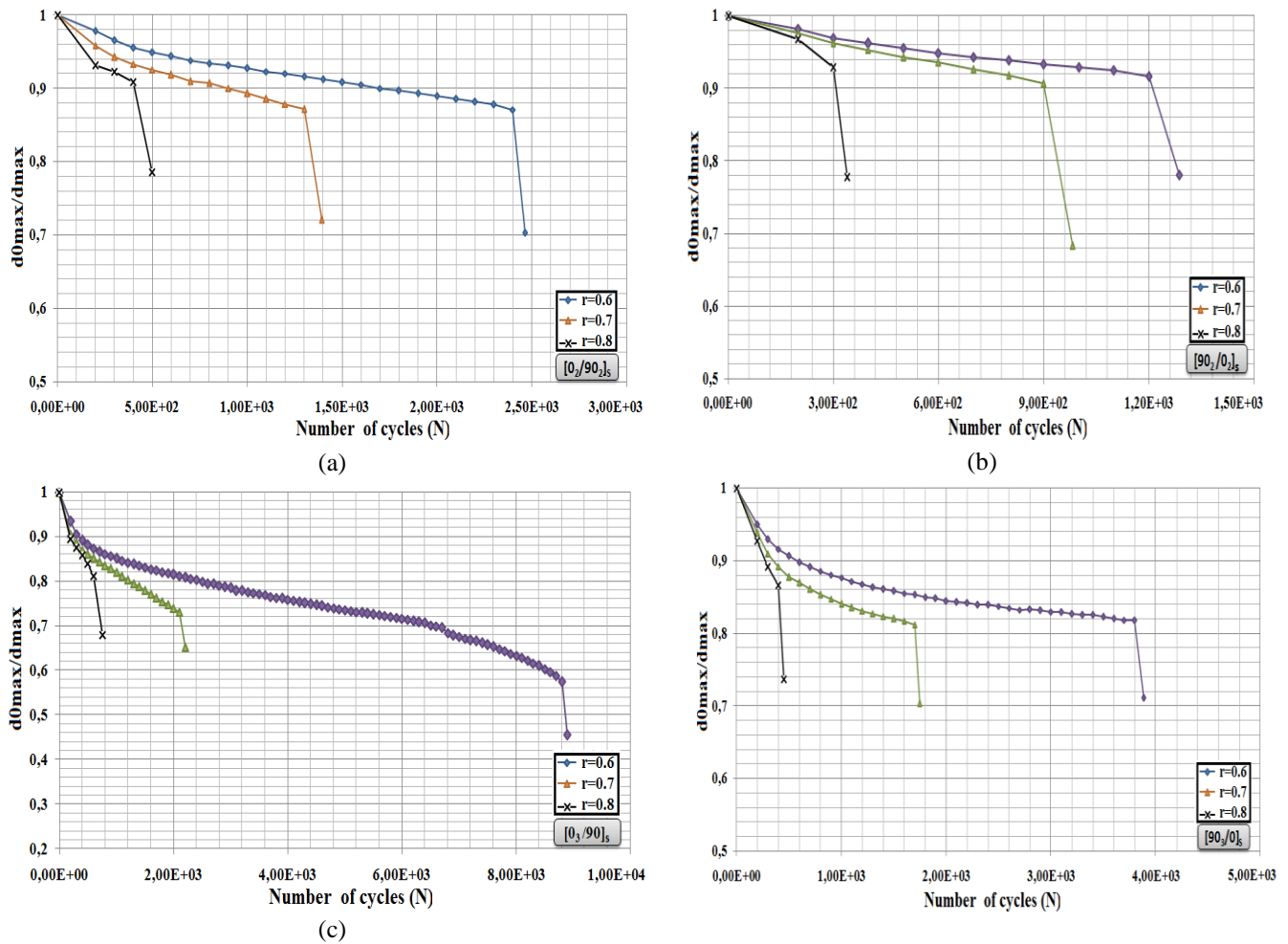


Fig.2 Chute de la rigidité au cours des essais de fatigue : (a) $[0_2/90_2]_s$, (b) $[90_2/0_2]_s$, (c) $[0_3/90]_s$ et (d) $[90_3/0]_s$

4.2 Évolution de l'endommagement en fonction du nombre de cycles

Le facteur d'endommagement associé au processus de dégradation mécanique peut être interprété comme la densité de surface des défauts affectant la matière. Ce dernier, dans des conditions de chargement et d'environnement identiques au cours des essais de fatigue, peut être défini par un paramètre D tel que :

$$\begin{aligned} D &= 0 ; \text{ pour } n=0 \text{ (au premier cycle)} \\ D &= 1 ; \text{ pour } n=Nr \text{ (à la rupture)} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Le degré de dégradation du matériau sous le chargement externe est représenté par le facteur d'endommagement D [15,16]:

$$D = \frac{d_{max} - d_{0max}}{d_{\alpha max} - d_{0max}} \quad (2.4)$$

Où d_{0max} est le déplacement initial, $d_{\alpha max}$ déplacement final et d_{max} déplacement à un nombre de cycles donné.

La Fig. 3 présente l'évolution du facteur d'endommagement D en fonction du nombre de cycles N pour les séquences d'empilement étudiées avant, et sous quatre niveaux de

chargement r (50%, 60%, 70%, et 80%). Les résultats issus de l'étude expérimentale (Fig. 3) montrent que l'évolution de l'endommagement en fonction du nombre de cycles jusqu'à la valeur critique se déroule en deux phases: une première phase où se manifeste une dégradation rapide dès les premiers cycles, cette dégradation étant d'autant plus importante que le niveau de chargement est élevé, suivi d'une deuxième phase plus lente où le matériau se dégrade progressivement jusqu'à la rupture ($D=1$). La Fig.4 présente les courbes de Wöhler pour les différentes séquences d'empilement étudié durant ce travail. Les éprouvettes avec les séquences d'empilement $[0_3/90]_s$ ont une durée de vie plus importante avec une résistance à la fatigue plus élevée.

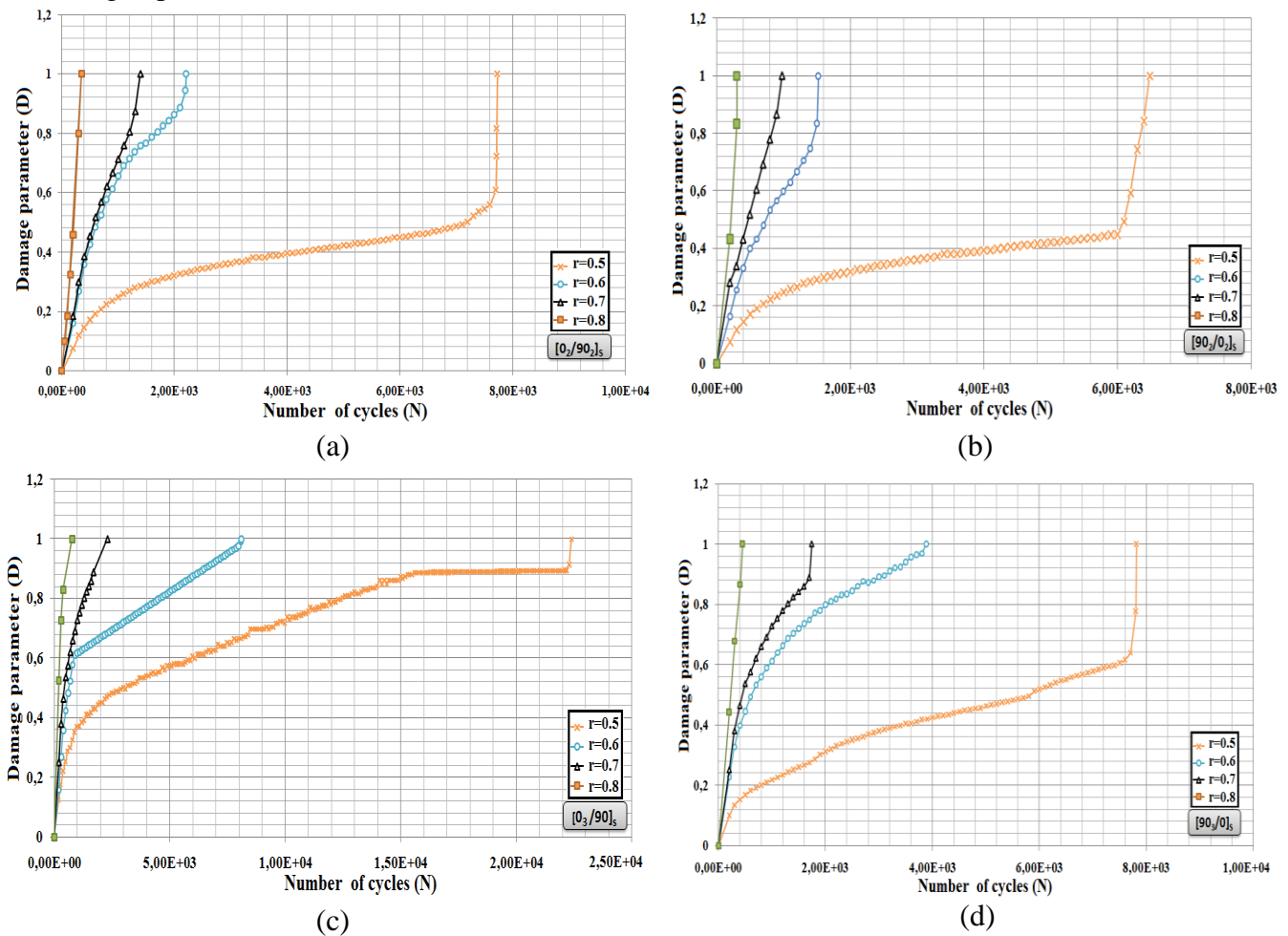


Figure. 3 Evolution du facteur d'endommagement en cours des essais de fatigue: (a) $[0_2/90_2]_s$, (b) $[90_2/0_2]_s$, (c) $[0_3/90]_s$ et (d) $[90_3/0]_s$

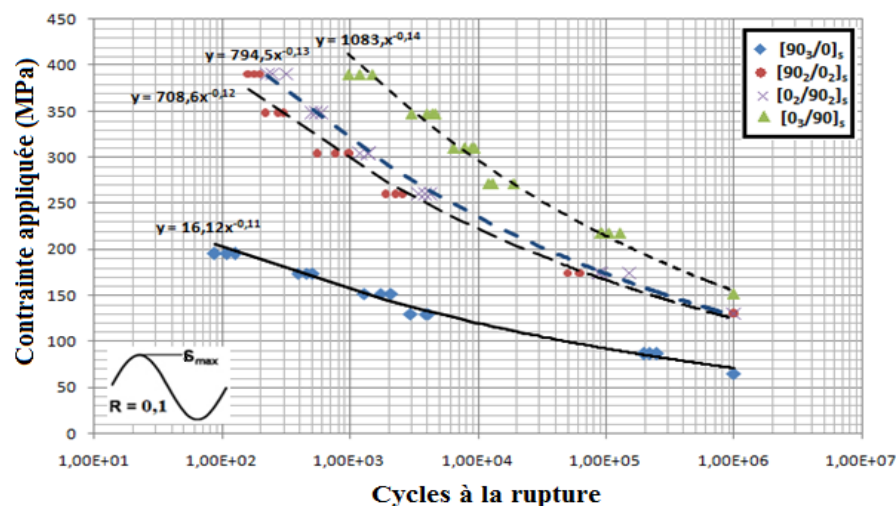


Figure. 4 Courbes contrainte/durée de vie pour les quatre séquences d'empilements

5. Conclusion

Les résultats de cette étude ont permis de suivre l'évolution de la rigidité des éprouvettes en fonction du nombre de cycles. Cette dernière est caractérisée par une diminution brutale dès les premiers cycles, ensuite dans la deuxième phase la diminution est très lente, ce qui correspond à la quasi-totalité de la durée de vie des éprouvettes et enfin dans la troisième phase très courte, la perte de rigidité s'accélère brutalement jusqu'à la rupture des échantillons. Les résultats issus de l'étude expérimentale montrent que l'évolution du facteur l'endommagement "D", en fonction du nombre de cycles jusqu'à la valeur critique se déroule en deux phases: une première phase où se développe une dégradation rapide dès les premiers cycles, cette dégradation étant d'autant plus importante que le niveau de chargement est élevé. La deuxième phase est plus lente où le matériau se dégrade progressivement jusqu'à la rupture ($D=1$).

References

- [1] Kashtalyan M, Soutis C . Stiffness degradation in cross-ply laminates damaged by transverse cracking and splitting. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2000;31: 335–351.
- [2] Zhang Ye, Anastasios P, Keller T. Stiffness degradation and fatigue life prediction of adhesively-bonded joints for fiber-reinforced polymer composites. *Int J Fatigue* 2008; 30: 1813–1820.
- [3] Kwon, W, Berner, M. Micromechanics model for damage and failure analysis of laminated fibrous composites. *Engineering Fracture Mechanics* 1995; 52, No. 2: 231-242.
- [4] Farooq MK, El Mahi A, Sahraoui S, Berthelot JM. Fatigue behaviour of sandwich composite materials. In: Ninth international conference on composites engineering; ICCE/9; July 1–6; 2002 in San Diego, USA.
- [5] Andersonsa J, Hojob M, Ochialic S. Empirical model for stress ratio effect on fatigue delamination growth rate in composite laminates. *Int J Fatigue* 2004; 26: 597-604.

- [6] El Mahi A., Farooq M.-K, Sahraoui S., A. Bezazi, "Modelling the flexural behaviour of sandwich composite materials under cyclic fatigue" *Materials and Design*, (25), pp. 199-208, 2004.
- [7] Berthelot J-M., El Mahi A., Le Corre J.-F., "Development of transverse cracking in cross-ply laminates during fatigue tests". *Composites Science and Technology*, Volume 61, pp. 1711-1721, 2001.
- [8] El Mahi A, Berthelot J-M, Brillaud J. Stiffness reduction and energy release rate of cross-ply laminates during fatigue tests. *Composite Structures* 1995; 30: 123-130.
- [9] Muc A, Bondyra A. Modeling of fatigue damage evolution in composite multilayered cylindrical shells; ICCM 2012.
- [10] Poursartip A, Ashby MF, Beaumont PWR. Damage accumulation during fatigue of composites. *Scripta Metallurgica* 1982; 16: 601-606.
- [11] Broutman L.I, Sahu S. A New theory to predict cumulative fatigue damage in fiberglass reinforced plastics. *composite materials* 1972; 170-188.
- [12] Wu F, Yao W. A fatigue damage model of composite materials. *Int J Fatigue* 2010; 32: 134-138.
- [13] Plumtree A, Melo M, Dahl J. Damage evolution in a $[\pm 45]_2S$ CFRP laminate under block loading conditions. *Int J Fatigue* 2010; 32: 139–145.
- [14] W. Hwan, C.S. Lee, H.C. Park, K.S. Han. Single and multi-stress level fatigue life prediction of glass/epoxy composites. *Journal of Advanced Materials*, 1995, 7, p 3-9.
- [15] Hwang W, Lee CS, Park H.C, Han K.S. Single and multi-stress level fatigue life prediction of glass/epoxy composites. *J Adv Mater* 1995; 1: 3-9.
- [16] Clark SD, Sheno RA, Allen HG. Modelling the fatigue behavior of sandwich beams under monotonic, 2 step and block loading regimes. *Compos Sci Technol* 1999; 59: 471–86.