HAL
open science

Etude expérimental et numérique de l'effet de la séquence d'empilement sur l'endommagement en fatigue d'un composite en verre époxy

Walid Roundi, Abderrahim El Mahi, Abdellah El Gharad, Jean-Luc Rebiere

To cite this version:

Walid Roundi, Abderrahim El Mahi, Abdellah El Gharad, Jean-Luc Rebiere. Etude expérimental et numérique de l'effet de la séquence d'empilement sur l'endommagement en fatigue d'un composite en verre époxy. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01621589

HAL Id: hal-01621589

https://hal.science/hal-01621589v1

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.

Etude expérimental et numérique de l'effet de la séquence d'empilement sur l'endommagement en fatigue d'un composite en verre époxy

Experimental and numerical study of the stacking sequence effect on fatigue damage in a glass epoxy composite

Walid Roundi[1] , Abderrahim El Mahi[2] , Abdellah El Gharad[1] , Jean-Luc Rebière[2]

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 Université du Maine, Av. Olivier Messiaen
72 085 Le Mans cedex 9, France
e-mail : jean-luc.rebiere@univ-lemans.fr

Résumé

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 nombreux paramètres. Dans cet objectif différentes études expérimentales ont été réalisés en ce qui concerne les endommagements sous sollicitations monotones ou cycliques, servant de base à des modélisations. Le présent article présentera une étude expérimentale et numérique du comportement mécanique des stratifiés verre/époxy. Quatre composites stratifiés sont étudiés, ils sont tous constitués de 8 plis en fibres de verre et d'une résine époxy avec différentes séquences d'empilement. Cette caractérisation est menée à partir des essais de traction réalisés sous différents niveaux de contraintes. Ensuite, une approche numérique est développée afin de prédire la durée de vie du composite verre/époxy en utilisant des calculs par éléments finis. La confrontation des résultats obtenus avec les deux approches est présentée au cours de cette étude.

Abstract

Degradation of mechanical properties in laminated composite is a complex mechanism which results from different modes of damage that depends on many parameters. For this purpose, different experimental studies have been carried out to characterize this damage under monotonic stresses. This paper presents an experimental and numerical study of the mechanical behavior of glass / epoxy composites. Four types of laminated composite made up of 8 plies of fiberglass and an epoxy resin with different stacking sequences are studied. This characterization is carried out with different tensile tests under various stress levels. Then, a numerical approach is applied to predict the fatigue life of the glass / epoxy composites using the finite element method (*FEM*). The comparison of the results obtained during the two approaches is presented in this study.

Mots Clés : Fatigue, séquence d'empilement, Composite, Endommagement
Keywords : Fatigue, stacking sequence, Composite, Damage

1. Introduction

Les composites en verre/époxy sont de plus en plus utilisés dans de nombreuses applications structurales que ce soit dans l'automobiles et l'aéronautiques en raison de leurs performances mécaniques élevées et de leur faible poids spécifique par rapport à d'autres matériaux. Les ingénieurs doivent considérer la charge de fatigue comme un facteur important qui peut conduire à la rupture de ce composite stratifié. Par conséquent, les propriétés mécaniques du composite en verre/époxy ont fait l'objet d'études approfondies en raison de leur composition micro-structurale (anisotropie, hétérogénéité, propriétés de l'interface fibre/matrice…). De nombreuses études [1-4] montrent que le comportement en fatigue dépend principalement de la perte de rigidité pendant les cycles de fatigue. Ces pertes de rigidité peuvent être divisées en trois parties : dans la première

partie une diminution rapide de la rigidité ; dans une deuxième partie une dégradation de la rigidité faible et sensiblement linéaire en fonction du nombre de cycles jusqu'à 90% de la vie totale ; Enfin, la troisième partie correspond à la dégradation de la rigidité associé à un développement rapide de tous les types d'endommagement par fatigue, y compris une rupture de l'interface fibre/matrice, rupture des fibres conduisant à ruine finale du composite stratifié. Différents paramètres ont une influence sur les propriétés en fatigue des structures composites (le nombre de plis, la séquence d'empilement, l'épaisseur du stratifié, le mode de chargement, la densité de fibres...). Brillaud et El Mahi [5] montrent l'influence significative de la séquence d'empilement sur la fissuration transverse dans les stratifiés composites soumis à des essais de fatigue cyclique. Johannesson [6] étudie expérimentalement la limite de contrainte de fatigue du composite verre/époxy afin de déterminer l'influence d'une ductilité améliorée du matériau de matrice sur les limites de contrainte. Dans cet article, le comportement en fatigue des composites en verre/époxy sous différents rapports de contraintes et pour différentes d'orientation de plies a été étudié. Des essais expérimentaux et des analyses numériques (Méthode des Eléments Finis) ont été conduits sur différents échantillons. Ils sont soumis à des essais de traction cyclique afin de décrire l'influence des rapports de contraintes et de la séquence d'empilement ($[0_2/90_2]_s$; $[90_2/0_2]_s$; $[0_3/90]_s$; $[90_3/0]_s$) sur les propriétés de fatigue. L'analyse statique est effectuée expérimentalement pour identifier les diagrammes contrainte-déformation, la déformation à rupture, le module d'Young et la résistance en traction pour chaque séquence d'empilement. La comparaison entre les essais expérimentaux et la prédiction numérique sont en bon accord. Les résultats de cette étude peuvent nous aider à choisir la séquence d'empilement optimale pour donner des conditions aux limites et pour atteindre la durée de vie maximale en fatigue du stratifié.

2. Mise en œuvre

Les composites étudiés durant ce travail sont mis en œuvre en utilisant des fibres longues stratifiées avec les séquences d'empilement suivants :$[0_2/90_2]_s$; $[90_2/0_2]_s$; $[90_3/0]_s$; $[0_3/90]_s$. 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 matériaux composites étudiés ont été réalisés par moulage sous vide, par la technique dite du "sac". Les différents plis sont positionnés manuellement selon la séquence citée ci-dessus. 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/démoulage. L'ensemble est placé dans un sac étanche, sous vide avec une dépression de 0,7 bar pendant 10 heures. La résine est 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 d'Acoustique du Mans (le LAUM). Le dosage utilisé est de 50% du taux de fibres de verre de densité 300 g/m² et de 50% du taux de résine époxyde de type SR1500. La technique à vide (ou "technique du sac") permet la mise en œuvre des composites de meilleure qualité qu'avec le moulage au contact, le taux de fibre est alors plus élevé puisque l'excès de résine est aspiré par la dépression créée lors de la mise sous vide. La géométrie de l'éprouvette de traction est donnée sur la Figure 1. Les caractéristiques mécaniques des fibres de verre et de la résine époxyde utilisées durant cette étude sont présentées sur les tableaux 1 et 2.

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

Tab. 1. Propriétés mécaniques de la fibre de verre

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

Tab .2. Propriétés mécaniques de la résine

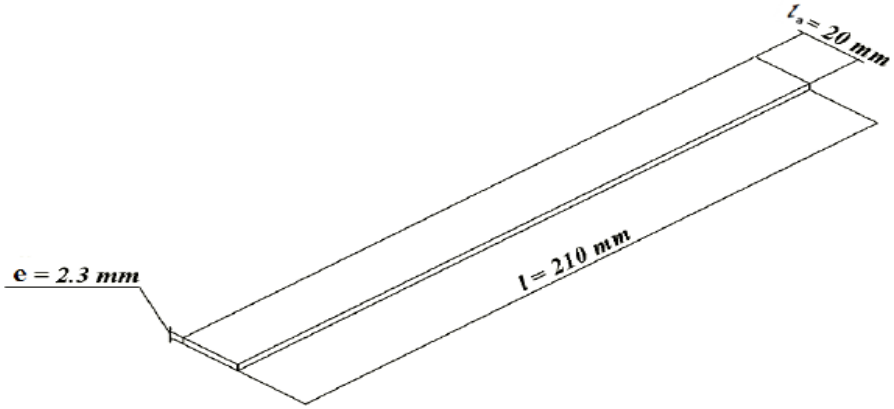

Fig. 1. Géométrie des éprouvettes

3. Dispositif expérimental

Les essais en statiques et en fatigue sont effectués sur une machine d'essais hydraulique universelle de type INSTRON 8516 (Figure 2), avec une capacité de 100 kN. La déformation de l'éprouvette suivant son longueur 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 est mesurée à l'aide d'un extensomètre. Le pilotage et l'acquisition se font par ordinateur. Cinq éprouvettes ont été testées pour chaque configurations afin de vérifier la validité des résultats. La déformation dans le sens de la traction a été mesurée au moyen d'un extensomètre d'une longueur de jauge de 50 mm. Les essais statiques ont été effectués en imposant un signal de déplacement avec une vitesse d'essai de 1 mm/min. Les essais de fatigue ont été effectués en utilisant une forme d'onde sinusoïdale avec un signal de charge d'une fréquence de 10 Hz. Les éprouvettes ont été testées sous différents niveaux de contrainte maximale (σ_{max}). Tous les essais de fatigue ont été effectués jusqu'à la rupture totale des éprouvettes. Les résultats nous permettent de tracer les courbes de Wöhler pour les différentes séquences d'empilement.

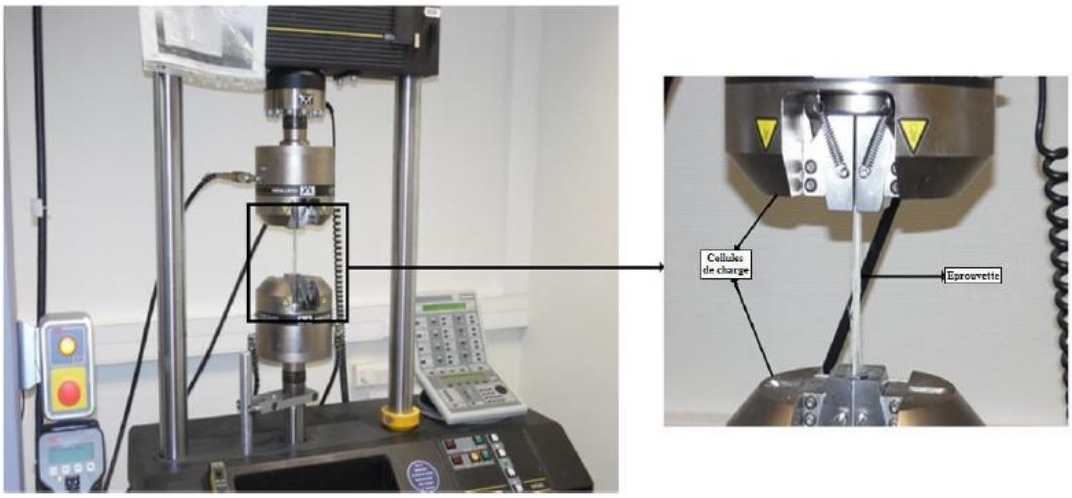

Fig 2. Dispositif expérimental

Dans la deuxième partie de ce travail, une étude numérique a été réalisée à l'aide de la méthode des éléments finis, afin de prédire le comportement mécanique et la durée de vie en fatigue des composites verre / époxy. Plusieurs modèles géométriques (modèles 3D) pour les quatre séquences d'empilement ont été créés et soumis à des conditions de chargements similaires à celles appliquées durant l'analyse expérimentale pour assurer la validité de l'analyse numérique. L'analyse de l'endommagement en fatigue utilisée durant cette étude se base sur une technique connue sous le nom de ''rainflow'' comptage [7, 8]. Cette méthode de comptage consiste à extraire des cycles élémentaires du signal appliqué, qui pourront par la suite être analysés individuellement par l'application des lois de fatigue, tel que les lois de Basquin ainsi de Coffin-Manson. Ce modèle de calcul permet de déduire le nombre de cycles à la rupture à partir de la déformation totale, tel que :

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Avec:

$$\varepsilon_{el} = \frac{\sigma'_f}{E}(2N)^b \qquad \text{(La loi de Basquin)} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon'_f (2N)^c \qquad \text{(La loi de Coffin-Manson)} \qquad \text{(Eq. 3)}$$

D'après les équations (2) et (3) on aura :

$$\varepsilon = \frac{\sigma'_f}{E}(2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c \qquad \text{(Eq. 4)}$$

ε_f': coefficient de ductilité
N: nombre de cycles
c: paramètre compris entre -0.8 et -0.5
σ'_f : facteur de résistance à la fatigue (fatigue strength coefficient)
E: le module de Young
b: exposant de la résistance à la fatigue, compris entre -0.05 et -0.12 (fatigue strength exponent)

L'algorithme de la méthode du comptage ''Rainflow'' a été développé par Tatsuo Endo et M.Matsuishi [9]. Dowling [10] et d'autres auteurs [11-14] montrent que cette méthode de comptage est l'une des meilleures méthodes utilisées par les codes de calcul par éléments finis afin d'étudier le comportement en fatigue des structures, puisqu'elle conduise à des résultats plus précis. Cette méthode peut être appliquée en utilisant des algorithmes différents dans la norme ASTM E 1049 à 1085 et l'AFNOR A03-406.

4. Résultats et discussions

4.1 Comportement en traction statique

La Figure 3 illustre l'évolution de la contrainte appliquée en fonction de la déformation nominale au cours des essais de traction statiques sur des éprouvettes avec différentes séquences d'empilements. Le but est de caractériser le comportement statique du composite stratifié en verre/époxy à travers l'identification et la comparaison des résultats obtenus pour les différentes orientations.
On peut déduire que le comportement statique des éprouvettes peut être décomposé en trois régimes. Les courbes charge-déformation font apparaître d'abord un comportement linéaire des échantillons jusqu'à des charges assez élevées, puis un comportement non linéaire très court jusqu'à

une charge maximale. La charge décroît ensuite progressivement, jusqu'à une chute assez rapide de la charge se produit.

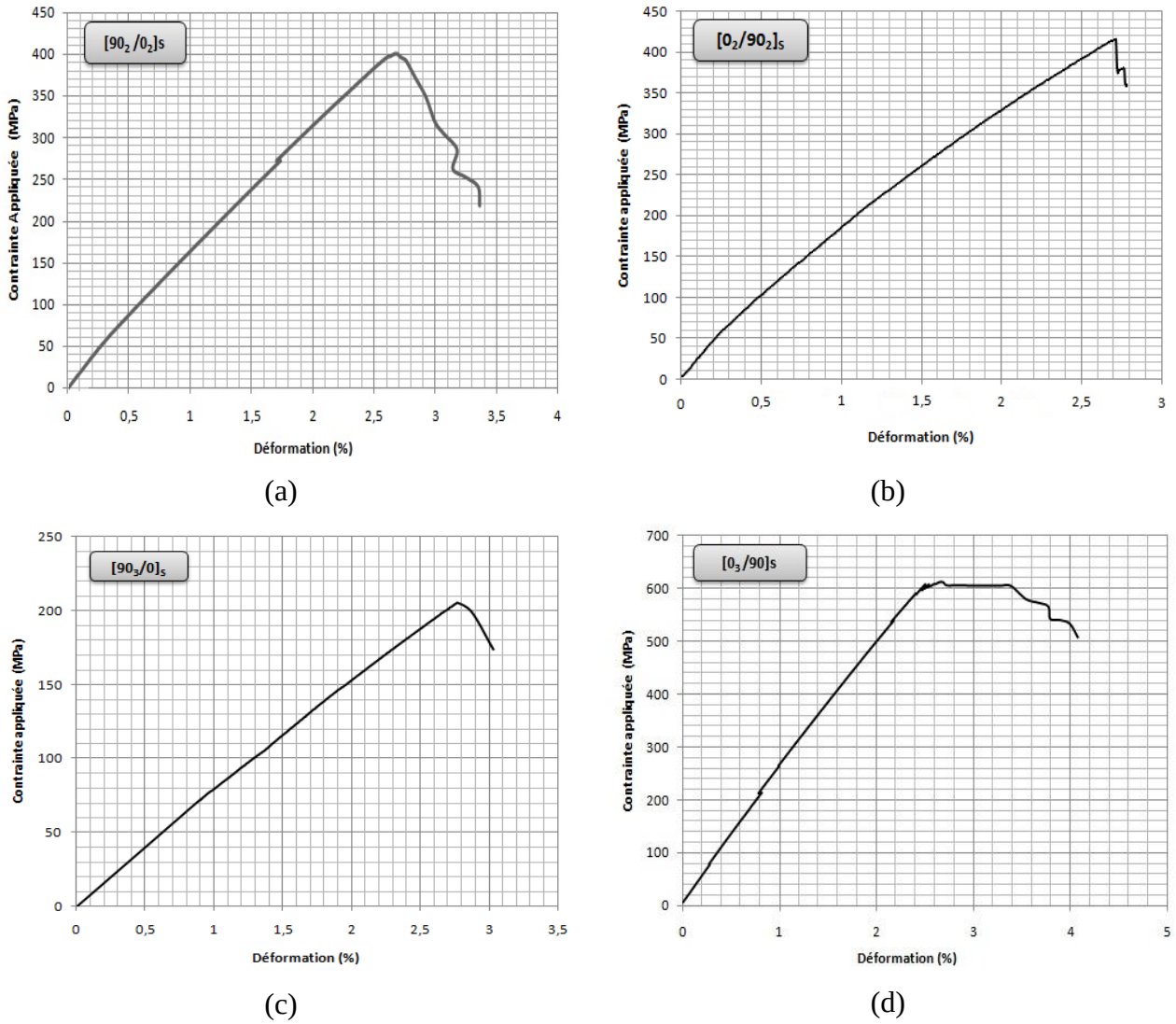

Fig. 3. Courbes contrainte/déformation

Les résultats illustrent les caractéristiques statiques pour chaque séquence d'empilement. Les résultats des contraintes à la rupture pour les éprouvettes testées avec différentes séquences d'empilement sont présentés sur la Figure 4.

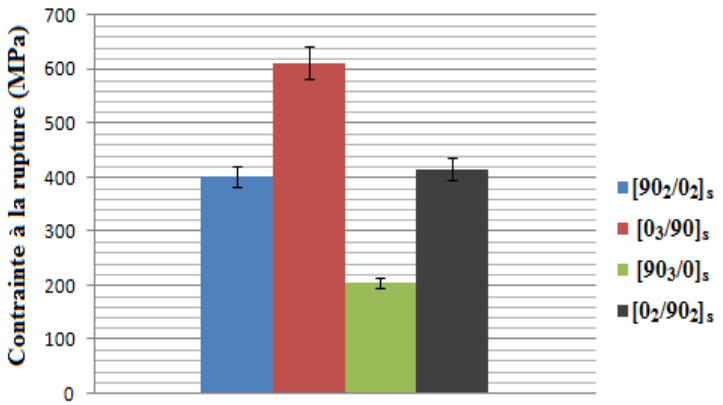

Fig.4. Contrainte à la rupture pour les différentes séquences d'empilement

Les caractéristiques statiques des couches orientées à 90° dans un stratifié verre/époxy mettent en évidence les faibles performances associées à cette orientation. La valeur du module de Young du stratifié $[90_3/0]_s$ est plus de trois fois inférieure à celle du module pour le stratifié $[0_3/90]_s$. Une comparaison des modules de Young des différentes séquences est reportée sur la Figure 5.

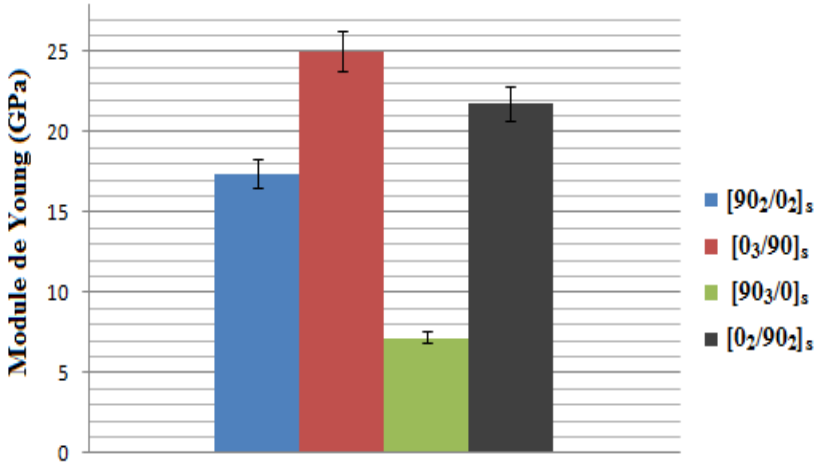

Fig. 5.Modules de Young pour les différentes séquences d'empilement

Ces résultats confirment clairement que le stratifié le plus résistant est celui avec plus de plis (6 plis) dans la direction de chargement $[0_3/90]_s$. En revanche, le stratifié $[90_3/0]_s$ est moins résistant, vu qu'il contient seulement deux couches orientée à 0°.

4.2 Comportement en traction cyclique

L'objectif de cette partie est l'étude expérimentale et par éléments finis de la cinétique d'endommagement par fatigue du composite verre/époxy sollicité en traction ondulée. Dans cette perspective on s'intéresse à l'analyse du comportement des éprouvettes avec les différentes séquences d'empilement présentées dans le précédent paragraphe. L'étude numérique est menée sous les mêmes conditions de chargements utilisées pendant les essais expérimentaux (R=0,1 ; f=10 Hz; Contrainte sinusoïdale constante), dans le but de garantir une meilleure adéquation entre les deux approches.

D'après les courbes de la charge appliquée/durée de vie présentées par la suite, on peut remarquer que les nombres de cycles à la rupture durant l'étude numérique est supérieurs de celui obtenus lors des essais expérimentaux. Cet écart reste acceptable en tenant compte des défauts possibles lors du processus de fabrication des éprouvettes des contraintes résiduelles qui sont variées selon les éprouvettes testées, et en prenant en compte d'autres paramètres liés au dimensionnement et à l'interfaçage fibre/matrice.

Les résultats (Figure 6) montrent que les éprouvettes avec la séquence d'empilement $[0_3/90]_s$ ont une résistance à la fatigue plus élevée. Cependant, les composites $[903/0]_s$ ont une durée de vie plus courte avec des processus d'endommagement plus accélérés. Il y a donc une bonne adéquation entre les résultats des deux études.

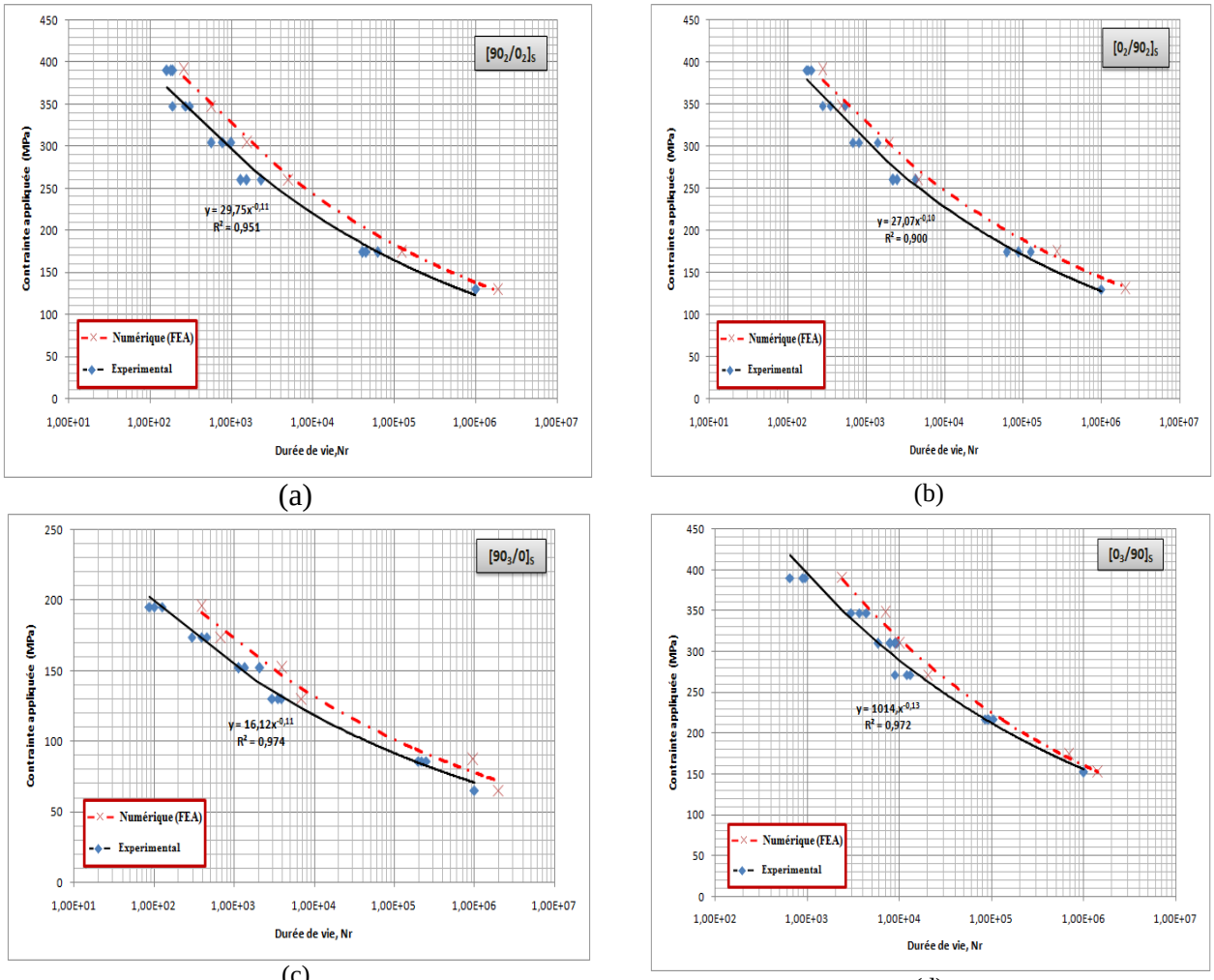

Fig. 6.Courbes de Wöhler sous (R=0.1): a) $[90_2/0_2]_s$, b) $[0_2/90_2]_s$, c) $[90_3/0]_s$ et d) $[0_3/90]_s$

5. Conclusions

D'après les résultats obtenus, il est clairement démontré que la séquence d'empilement a un impact considérable sur la durée de vie et la résistance à la rupture des composites verre/époxy durant les chargements statiques et cycliques. Les courbes de Wöhler présentées au cours de cette étude mettent en évidence les performances élevées des stratifiés $[0_3/90]_s$, avec une résistance à la rupture plus importante à la comparaison d'autres séquences étudiées. Les caractéristiques statiques et cycliques des couches orientées à 90° dans un stratifié verre/époxy mettent en évidence les faibles performances associées à cette orientation. La valeur du module de Young du stratifié $[90_3/0]_s$ est plus de trois fois inférieure à celle du module pour le stratifié $[0_3/90]_s$.

Références

[1] El Mahi A, Berthelot J-M, Brillaud J. Stiffness reduction and energy release rate of cross-ply laminates during fatigue tests. Composite Structures.; 30, pp.123-130, 1995.

[2] Kashtalyan M, Soutis C. Stiffness degradation in cross-ply laminates damaged by transverse cracking and splitting. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 31(4), pp. 335–351, 2000.

[3] Zhang Y, Vassilopoulos A P, Keller T. Stiffness degradation and fatigue life prediction of adhesively-bonded joints for fiber-reinforced polymer composites. International Journal of Fatigue. 30(10-11), pp.1813–1820, 2008.

[4] Rebière J.-L., Gamby D. A criterion for modelling initiation and propagation of matrix cracking and delamination in cross-ply laminates. Composites Science and Technology. 64(13-14), pp.2239-2250, 2004.

[5] Brillaud J. El Mahi A. Numerical Simulation of the Influence of Stacking Sequence on Transverse Ply Cracking in Composite Laminates. Composite Structures. 17(1): pp.23-35, 1991

[6] Johannesson Th. Fatigue strength of glass fiber/epoxy angle.ply laminates with different matrix ductility. Mechanics of Composite Materials, 28(5): pp.439-444, 1993

[7] Downing S D, Socie D F. Simple rainflow counting algorithms. International Journal of Fatigue, 4(1): pp. 31–40, 1982.

[8] Olagnon Guédé Z. Rainflow fatigue analysis for loads with multimodal power spectral densities. Marine Structures. 21 (2-3), pp.160–176, 2008.

[9] Matsuishi M, Endo T. Fatigue of metals subjected to varying stress. Japan Society of Mechanical Engineers. pp. 37-40, 1968.

[10] Dowling NE. Fatigue failure predictions for complicated stress–strain histories. Journal of Materials. 7(1), pp. 71–87, 1972.

[11] Amzallag C, Gerey J.P, Robert J.L, Bahuaud J. Standardization of the rainflow counting method for fatigue analysis. International Journal of Fatigue. 16(4), pp. 287-293, 1994.

[12] Colombia P, Doliñskib K. Fatigue lifetime of welded joints under random loading: rainflow cycle vs. cycle sequence method. Probabilistic Engineering Mechanics. 16, pp. 61–71, 2001.

[13] Rychlik I, Gupta S. Rain-flow fatigue damage for transformed gaussian loads. International Journal of Fatigue. 29(3), pp. 406–420, 2007.

[14] Martin J.F. Cyclic Stress-Strain behavior and fatigue resistance of two structural steels. Fracture control program report no.9. University of illinois at urbana-champaign, 1973.