

COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN STRATIFIE CROISE CHARGE EN FLEXION 3- POINTS STATIQUE ET CYCLIQUE

K. BEY *, L. FATMI **, M. KHAROUBI**

*Université Badji Mokhtar Annaba, Département de mécanique
E- Mail: kbeydz@yahoo.fr

**université du 08 mai 1945, Laboratoire de Mécanique et Structures, Département de Mécanique, Guelma.
E- Mail : l_fatmi@hortmail.com
E- Mail : mounirkharoubi@yahoo.Fr

RESUME

Ce travail expérimental a été réalisé au laboratoire du Groupe Composites et Structures Mécaniques (GCSM) de l'Université du Maine, en collaboration avec le laboratoire de Mécanique et Structure de l'Université de Guelma.

Il consiste à tester un matériau composite en flexion trois points statique et cyclique sur une machine Instron et de déterminer les mécanismes d'endommagement et de rupture.

Les résultats obtenus montrent un comportement élastique endommageable du matériau. La dispersion des résultats observée aussi bien pour le module de Young que pour la contrainte à la rupture a pour cause le mode de mise en œuvre et la microstructure du matériau élaboré.

Les courbes obtenues dans le cas de la flexion cyclique montrent clairement la perte de rigidité F/F_0 en fonction du nombre de cycles. Ceci confirme la faible durée de vie du stratifié étudié. L'examen du faciès de ruptures des éprouvettes testées a mis en évidence un endommagement par délaminage des plis et fissuration transversale.

ABSTRACT

This experimental work has been achieved to the laboratory of group composites mechanical structures of the university of Maine, in collaboration with the laboratory of mechanics and structure of the university of Guelma. It consists in testing a composite material in bending-three points, static and cyclic in Instron machine and to determine mechanisms of damage and failure.

The gotten results show an elasticity and damageable kind of materials. The scattering results observed as well as for young's modulus that for the failure stress, has the appropriate reason for the mode work and microstructure of the elaborate material.

The gotten curves in the case of cyclic bending clearly show the less of stiffness F/F_0 according to the number of cycles. It confirms the short life of studied stratified. the facies exam of failure of tested tubes put in evidence a damage by delamination of folds and transverse crack

Mots clés : Composites, Stratifiés, Endommagement, Flexion, Traction, Délaminage.

INTRODUCTION

Un composite est un ensemble d'au-moins deux matériaux constitués d'une part de la matrice fragile (époxyde, polyester, ..etc.) et d'autre part de renforts rigides de modules très élevés (Carbone, verre... etc..)

La diversité des constituants de base et les assemblages possibles font une grande variété de composites dont les caractéristiques et les comportements mécaniques sous sollicitations sont aussi différents.

L'intérêt que présentent ces matériaux est justifié par la volonté de réduire le poids à vide des véhicules afin de pouvoir transporter une plus grande quantité de marchandises et avoir une meilleure résistance à la corrosion. Toutefois certains aspects de comportement sous sollicitations diverses demeurent incompris d'où en enregistre plusieurs axes de recherche.

L'endommagement des composites stratifiés et des matériaux hétérogènes a fait l'objet de modélisations diverses tant numériques qu'expérimentales [1-2-3-4]. Une méthodologie de conception des stratifiés exhibant des propriétés de rigidités données et une description des principaux aspects de la mise en œuvre numériquement ont été proposées dans la littérature [5]. D'autres travaux se sont intéressés aux dispersions importantes souvent constatées de la résistance des composites unidirectionnels et dont le concepteur doit tenir compte lors du dimensionnement de structures. La cause de cette dispersion et ses liens avec la microstructure des matériaux composites à fibres longues sont toujours d'actualité. Même si la détermination par des essais normalisés des propriétés mécaniques du matériau s'avère primordiale, il est également très intéressant de disposer de modèles permettant la prévision de ces propriétés en fonction de celles des constituants.

Il est à noter que les études sur les matériaux à fibres courtes, quoique déjà anciennes restent limitées [6-7-8-9]. De l'avis de MJ Owen, dans le cas des systèmes, résines polyester - mat de verre, la rupture des interfaces et de la matrice précède les autres formes d'endommagements. La coalescence et la multiplication de ces mécanismes sont plus marquées sous sollicitation cyclique qu'en chargement statique.

En vue de connaître les performances du matériau composite étudié, nous nous sommes intéressés à deux de ses aspects qui sont le comportement mécanique et l'endommagement en flexion 3-points aussi bien statique que cyclique.

PRESENTATION DE L'EXPERIMENTATION

Elaboration des stratifiés

Le stratifié croisé contenant 16 plis différenciés par leurs séquences d'empilement a été élaboré par le Groupe Composites et Structures Mécanique (G.C.S.M) de l'université du Maine, France. Ce matériau est constitué d'un tissu de fibres de verre unidirectionnelles de masse surfacique 300 g/m^2 et de résine époxyde SR 1500/SD 2505. Ces constituants sont fabriqués par la société SICOMIN.

Le mode d'obtention de ces matériaux est le moulage sous vide utilisant la technique dite du sac.

Les plis sont stratifiés et imprégnés à température ambiante, puis sous vide à dépression de 30Kpa pendant 10 heures entre le moule et le contre moule. Ce stratifié est épais et noté par $[0_6/90_2]_s$

Pyrolyse du matériau étudié

Pour vérifier les taux de résine et de renforts contenus dans le matériau étudié nous avons eu recours à une technique appelée Pyrolyse. Cette technique consiste en la découpe de quatre échantillons de surfaces approximativement égales à 1 cm^2 chacune.

Un pesage de chacun des échantillons est réalisé avant la mise au four et noté M1 en grammes. Ensuite, les quatre échantillons sont fixés dans le four à renouvellement d'air enflammé. La calcination de ces échantillons a lieu à 600°C pour une durée de 10 heures.

Après refroidissement, le résidu de verre est pesé pour chaque échantillon et est noté M2 en grammes. Ainsi la perte de résine par la calcination est $M = M1 - M2$.

Le taux de résine peut s'exprimer par $R = M/M1\%$ et le taux de fibre par le complément soit $(100 - R)\%$.

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau 1.

Tableau 1 : constituants du matériau étudié avant et après pyrolyse

Matériau	Echantillon	Poids (en gramme)			Taux (en %)			
		Avant Pyrolyse	Après Pyrolyse	Résine	Fibres	Moyen des fibres	Résine	Moyen de résine
$[0_6/90_2]_s$	1	0,81	0,48	0,33	59,26		40,74	
	2	0,79	0,50	0,29	63,30	61,46	36,70	38,54
	3	0,79	0,50	0,29	63,30		36,70	
	4	0,80	0,48	0,32	60,00		40,0	

Banc d'essai

Les essais en flexion 3-points statique et cyclique sont réalisés sur une machine de type Instron piloté par ordinateur et équipée d'un système d'acquisition de données (Figure 1).

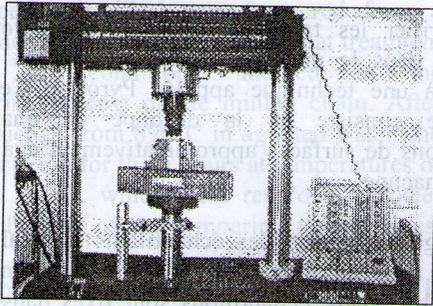


Figure 1 : Banc d'essais

Préparation des éprouvettes

Le tableau 2 comporte les épaisseurs des éprouvettes utilisées.

Tableau 2 : Epaisseurs des éprouvettes utilisées

Eprouvettes	H [mm] ; [0 ₆ /90 ₂] _s
1	5,05
2	5,31
3	4,40
4	5,26
5	4,96

Ces éprouvettes parallélépipédiques ont été découpées à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté à partir de plaques de 300 × 300 mm² de dimensions, L = 20h, l = 16h et b = 15 mm selon la norme AFNOR NF T 57-105, où L, l, b et h sont

respectivement la longueur totale, la longueur entre appuis, la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette.

RESULTATS OBTENUS

En flexion 3 points statique

Les courbes de comportement mécanique charge - déplacement obtenues en flexion 3 points statique sont représentées sur la figure 2.

Le calcul des caractéristiques mécaniques en flexion 3 points statiques est basé sur la relation (1) pour les contraintes à la rupture en flexion σ_F et par l'utilisation de la relation (2) pour les valeurs du module de Young en flexion E_F .

$$(1) \quad \sigma_F = \frac{3.F.l}{2.b.h^2}$$

$$(2) \quad E_F = \frac{l^3}{4.b.h^3} \frac{\Delta F}{\Delta d}$$

où

F : la charge à la rupture appliquée [N] ;

l : longueur entre appuis [mm] ;

b : largeur de l'éprouvette [mm] ;

h : l'épaisseur [mm] ;

ΔF : variation de la force sur la partie rectiligne de la courbe charge déplacement ;

Δd : variation de la flèche en [mm], correspondante à la variation de la force.

Le tableau 3 rassemble les valeurs mesurées.

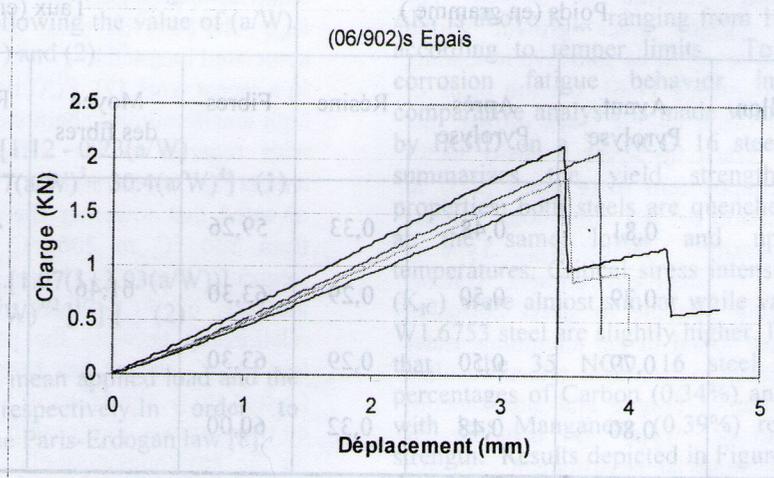


Figure 2 : Courbes de comportement expérimental charge - déplacement en flexion 3 points statique

Tableau 3 : Contraintes à la rupture et module de Young calculés en flexion trois points statique

[0 ₆ / 90 ₂] _{sEp}					
Eprouvettes	F(KN)	σ_f [MPa]	$\sigma_{f\text{moy}}$ [MPa]	E_f [MPa]	$E_{f\text{moy}}$ [MPa]
1	2,118	671	625	109197	124625
2	2,071	624		120662	
3	1,828	664		127286	
4	1,683	542		141316	

Analyse des résultats du point de vue comportement

L'allure des courbes de comportement expérimentale charge - déplacement en flexion 3-points statique met en évidence une zone linéaire élastique associée à un délaminage des couches. La création de premières microfissures et leurs coalescences conduit directement à la rupture des éprouvettes. Ceci rejoint les constatations faites par L. Fatmi et col sur des matériaux similaires [8]. Par ailleurs les résultats obtenus par le calcul de la contrainte à la rupture et du module d'élasticité pour chaque éprouvette dénotent une petite variation dans leurs valeurs et cela s'explique par les défauts d'élaboration (bulles, porosité...etc.) pour le 1^{er} cas et par l'hétérogénéité de la microstructure (taux et orientation des fibres) pour le 2^e cas

Analyse des résultats du point de vue endommagement

Les photos illustrant les mécanismes de rupture observés après rupture des éprouvettes ont été prises sur un microscope optique (figure 3)

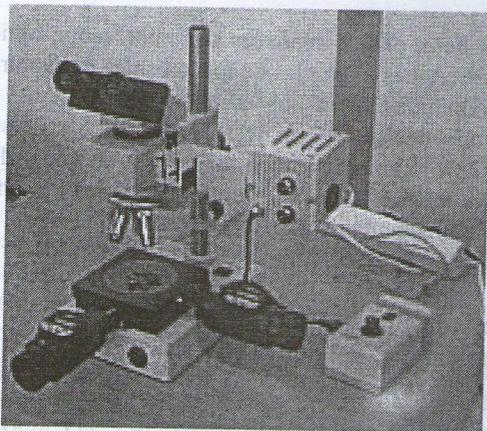
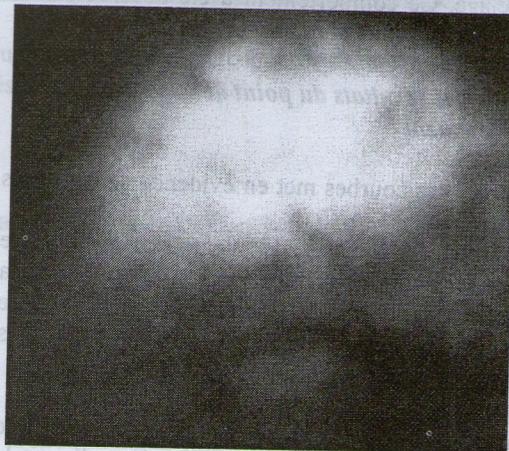


Figure 3 : Microscope optique

Les observations montrent un endommagement mixte délaminage des plis et fissuration transversale au niveau des couches les plus tendues



a) Rupture par délaminage.



b) Rupture mixte délaminage et fissuration transversale.

Figure 4 : Modes d'endommagements observés après rupture en flexion 3- points statique

En flexion 3 points cyclique

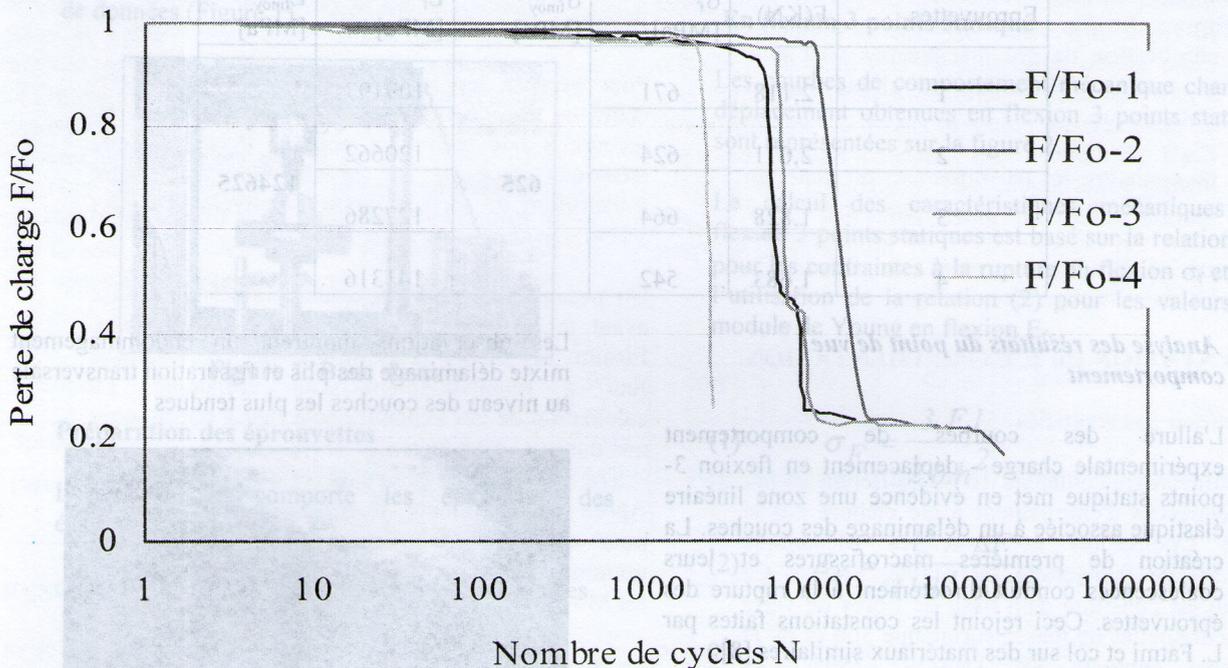


Figure 5 : Courbes de comportement expérimental
Perte de charge - Nombre de cycles en flexion cyclique

Les courbes de la figure 5 montrent les enregistrements relevés de la perte de charge durant le cyclage. Ce comportement a été observé sur un matériau composite similaire [10].

Analyse des résultats du point de vue comportement

L'analyse des courbes met en évidence deux phases de décroissance.

Une première phase de décroissance linéaire progressive qui occupe une partie importante de la durée de vie de ce matériau. Cette décroissance s'explique par l'apparition et le développement des sites d'endommagement localisés.

Quant à la deuxième phase qui s'explique par une chute brutale de la rigidité du matériau, elle est la conséquence d'une coalescence de microfissures engendrant des macrofissures qui seront à l'origine de la rupture totale.

L'analyse quantitative de ces résultats nous renseigne sur la tenue du matériau d'où on peut considérer qu'une perte de rigidité de 10 % en

fatigue est largement suffisante pour considérer que l'endommagement du matériau est irréversible. Car au-delà de cette valeur il y a risque de chute brutale de la rigidité du matériau.

Analyse des résultats du point de vue endommagement

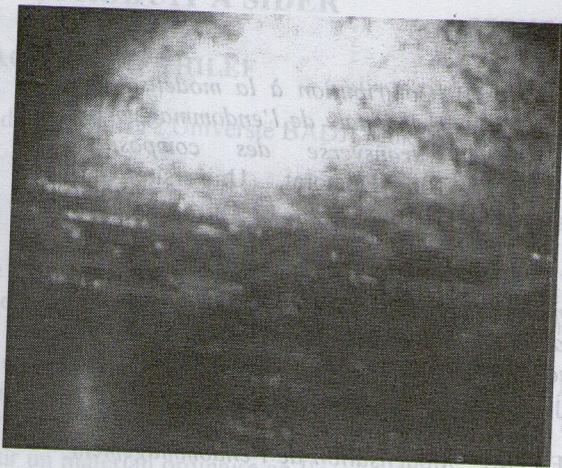
Ces deux photos réalisées sur microscope optique illustrent des exemples de mécanismes de rupture et d'endommagement observés après rupture des éprouvettes en flexion cyclique (figure 6). Le suivi de l'évolution de l'endommagement au cours de la flexion cyclique a montré que les premiers endommagements apparaissent au centre de la face opposée au chargement de l'éprouvette.

Ces endommagements précurseurs conduisent à la création de fissures transversales de la matrice suivant la largeur de l'éprouvette. Ces fissures qui se propagent ensuite à l'intérieur du matériau sont suivies par un délaminage des plis conduisant à la rupture de l'éprouvette.

INFLUENCE DU TRAITEMENT MECANIQUE PAR BRUNISSAGE SUR LA TENUE A L'USURE DE L'ACIER (BB40) PRODUIT A SIDER



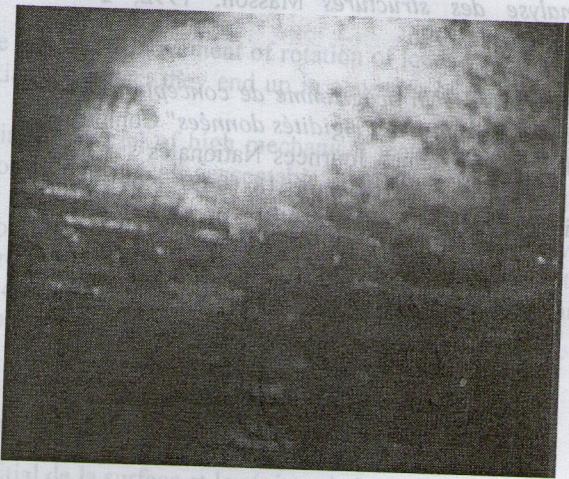
a) Rupture par délaminage à partir d'une inclusion de résine dans les plis à 90° et début de rupture des plis à 0°.



b) Rupture par délaminage à partir d'une inclusion de résine dans les plis à 90°



a) Rupture par délaminage à partir d'une inclusion de résine dans les plis à 90° et début de rupture des plis à 0°.



b) Rupture par délaminage à partir d'une inclusion de résine dans les plis à 90°

Figure 6 : Modes d'endommagements observés après rupture en flexion 3- points cyclique

CONCLUSION

Les résultats, dans le cas de la flexion 3-points statique, ont permis de mettre en évidence un comportement linéaire élastique expérimental "charge - déplacement" des éprouvettes testées. Quant à la dispersion des résultats obtenus pour le module de Young et la contrainte à la rupture en flexion, elle est essentiellement liée au mode de mise en œuvre du matériau étudié et de sa microstructure.

Les courbes obtenues lors de la flexion cyclique dénotent une perte de rigidité F/F_0 en fonction du nombre de cycles. La perte de rigidité de ce matériau s'explique d'abord, par la création de sites d'endommagements localisés suivie d'une autre création de microfissures, et leurs coalescences conduisent inévitablement à la ruine de l'éprouvette. L'examen des mécanismes d'endommagement et de rupture par microscope optique a mis en évidence un délaminage des plis et une fissuration transversale.

En flexion 3 points cyclique

REFERENCES

[1] A.EL MAHI "Contribution à la modélisation numérique et expérimentale de l'endommagement par fissuration transverse des composites stratifiés" Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France. 1991

[2] L.FATMI, J.M.BERTHELOT "Modélisation de l'endommagement des matériaux hétérogènes : application au béton cas de la flexion 3 points statique" Revue française de Mécanique, N 2, pp. 89-97 juin 2001

[3] L.FATMI " Modélisation de l'endommagement des matériaux hétérogènes par ré analyse après modification locale de la matrice de rigidité" Thèse de Doctorat, Université du Maine, Mai 1994.

[4] J.M BERTHELOT "Comportement mécanique et analyse des structures" Masson, 1992, 2^{ème} édition, France 1996

[5] GREDIAC "Un programme de conception des stratifiés présentant des rigidités données" Comptes Rendus des Onzièmes Journées Nationales sur les Composites, v. 1, Arcachon 18-19-20 Nov. 98, publiés par J. Lamon et D. Baptiste, pp. 197- 204.

[6] B. REDJEL, DE CHARENTENAY F.X "Comportement mécanique des matériaux composites SMC" Matériaux et Technique, pp. 221-228, Mai -Juin 1987

[7] M.J. OWEN "Fatigue damage in fiber reinforced composite materials" 1974

[8] L. FATMI, B. REDJEL, J. M. BERTHELOT " Etude expérimentale du comportement mécanique en flexion 3 points monotone et cyclique de stratifiés symétrique verre-polyster et non symétrique hybride Kevlar-verre-polyester " Comptes rendus des JNC13 Strasbourg, 12, 13 et 14 Mars 2003.

[9] M. BENAMIRA " Caractérisation à la rupture d'un matériaux composite à utilisation orthopédique " Thèse de Magister, Département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar Annaba, Mars 2003.

[10] L. FATMI, B. REDJEL & J. M. BERTHELOT " ", JNC 13, Strasbourg, Mars 2003, France.