ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES COMPOSITES À FIBRES DE VERRE/ÉPOXY EN CISAILLEMENT À GRANDE VITESSE DE DÉFORMATION

C. Chiem, Z. Liu, J. Ramousse

► To cite this version:

C. Chiem, Z. Liu, J. Ramousse. ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES COMPOSITES À FIBRES DE VERRE/ÉPOXY EN CISAILLEMENT À GRANDE VITESSE DE DÉFORMATION. Journal de Physique Colloques, 1985, 46 (C5), pp.C5-535-C5-542. 10.1051/jphyscol:1985569 . jpa-00224802

HAL Id: jpa-00224802

<https://hal.science/jpa-00224802>

Submitted on 1 Jan 1985

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.

ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES COMPOSITES À FIBRES DE VERRE/ÉPOXY EN CISAILLEMENT À GRANDE VITESSE DE DÉFORMATION

C.Y. Chiem, Z.G. Liu et J.P. Ramousse

Ecole Nationale Supérieure de Mécanique, Laboratoire des Sciences des Matériaux de la Mécanique, Groupe DYNAMAST, 44000 Nantes, France

Résumé - Cette étude du comportement au choc des composites à résine époxy utilise le principe des barres de Kolsky en torsion modifiées pour le cisaillement. Une description succincte de la méthode est faite. Elle est suivie de résultats expérimentaux avec une discussion sur les problèmes rencontrés au plan expérimental. Il semble que la vitesse de déformation critique autour de 2000 s^{-1} pose le problème le plus important au niveau du comportement aux grandes vitesses de déformation des composites U.D. à matrice de résine. Des problèmes de délaminage généralisé, de cisaillement interlaminaire et d'élévation de température en cours de déformation à grande vitesse se sont posés.

Abstract - The principle of torsional Kolsky bars modified for simple shear tests are applied for this study on epoxy-resin and glass-fiber composites. A short description of the method is done. It is followed by discussions on problems encountered in the experimental results. It seems that a critical strain-rate around 2000 s^{-1} enhances an important point on the high-strain-rate behaviour of U.D. composites with resin matrix ; Problems concerning generalized delamination, interlaminar shear and temperature increment during high strain-rate deformation are mentioned.

I - INTRODUCTION

Le comportement dynamique des matériaux composites soumis aux grandes vitesses de déformation reste un problème ouvert de grandes complexités théorique et expérimentale. F. Devries et F. Lene /1/ ont donné une analyse théorique par une schématisation du phénomène de pénétration en milieu composite. Au point de vue expérimental, C.Y. Chiem et al./2/ ont classé dans une monographie des résultats assez complets du sujet. Dans les essais utilisant la technique des barres de Hopkinson, trois types d'essais sont intéressants à citer : compression, traction, cisaillement.

On ne propose, ici, que les essais par barres de Kolsky (ou de Hopkinson) en torsion. Cet article présente successivement la méthodologie, l'interprétation des premiers résultats et l'aspect de l'endommagement des matériaux composites suivants :
composite I : tissu de verre équilibré / résine 470-36 ;
composite II : tissu de verre équilibré / résine XD 8084-05.

II - METHODOLOGIE DES BARRES DE KOLSKY EN TORSION

2.1. Principe des barres de Kolsky en torsion

Le dispositif de Kolsky en torsion est décrit à plusieurs reprises par de nombreux auteurs tels que Duffy et al. /3/, Chiem et al. /4,5,6/. Ainsi, nous ne faisons qu'un descriptif rapide de ce dispositif.

Un dispositif de Kolsky en torsion est généralement constitué d'une barre d'entrée, d'une barre de sortie et d'un système moteur qui sert à appliquer une prétorsion entre l'extrémité libre de la barre d'entrée et des mâchoires. Lors de l'ouverture des mâchoires obtenue par la rupture d'une vis de serrage, le couple emmagasiné se propage dans la barre d'entrée, se réfléchit partiellement et se transmet à travers

l'échantillon dans la barre de sortie. La figure 1 présente ce dispositif d'essais.

Si v est la vitesse tangentielle sur la barre d'entrée, on a :

$$v = r \cdot \omega = 2 \cdot \frac{T_O/2}{J \rho C_T} \cdot r \quad (1)$$

où T_O est le couple emmagasiné, J , le moment polaire de la section de la barre, ρ , la masse volumique du matériau de la barre et C_T , la vitesse de l'onde de torsion dans les barres. ω est la vitesse angulaire de la barre.

Compte tenu que $(T_O)_{\max} = \frac{\tau_Y \cdot J}{r}$ où τ_Y est la limite élastique du matériau de la barre, on a :

$$v_{\max} = \frac{\tau_Y}{\rho C_T} \quad (2)$$

Si l'on suppose que le rayon maximum de l'échantillon est égal à celui de la barre, la vitesse de déformation maximale est alors :

$$\dot{\gamma}_{\max} = \frac{\tau_Y}{\rho C_T \ell_u} \quad (3)$$

où ℓ_u est la longueur utile de l'échantillon. Pour obtenir la plus grande valeur possible de $\dot{\gamma}_{\max}$, il faut que $\tau_Y/\rho C_T$ soit maximum pour les barres et que ℓ_u soit minimum pour l'échantillon. C'est ainsi que nous avons choisi l'alliage d'aluminium 79 comme matériau des barres ($G = 26800$ MPa, $\rho = 2700$ kg/m³, $C_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = 3100$ m/s). Le rayon des barres est de 15 mm.

En ce qui concerne le traitement des signaux, on peut utiliser les signaux de l'onde réfléchie, et de l'onde transmise ; le premier type de signal donne la vitesse de déformation et la déformation, le deuxième donne la contrainte de cisaillement au niveau de l'échantillon. Ce procédé décrit en termes de couples d'entrée T_i et de sortie T_t (voir figure 2) se traduit par les formules suivantes :

- La contrainte de cisaillement au niveau de l'échantillon parallélépipédique est (cf. fig. 3) :

$$\tau = \frac{T_t}{2 r_m h_1 h_2} \quad (4)$$

où r_m est le rayon moyen de l'échantillon.

- La vitesse de déformation est calculée par la relation :

$$\dot{\gamma} = \frac{2 (T_i - T_t)}{J \rho C_T} \cdot \frac{r_m}{h_3} \quad (5)$$

Notons que $T_i - T_t = T_r$ (T_r = couple de l'onde réfléchie)

- La déformation est donc obtenue par intégration de $\dot{\gamma}$ en fonction du temps.

2.2. Définition de l'échantillon dans le premier lot d'essais

Les composites qu'on nous a fournis sont des plaques (renfort en poids 70 %, tissu à 8 couches croisées à 90°). La figure 3 et le tableau 1 donnent la géométrie des échantillons. Les échantillons entaillés permettent d'avoir un endormagement dans la zone de cisaillement. Le problème majeur dans les essais en cisaillement est la transmission du couple à l'échantillon. Des essais de fixation par collage ont montré qu'il y avait rupture au niveau de la couche externe du composite constituée de résine. Aussi, avons nous adopté le système d'encastrement (cf. fig. 4) renforcé par un collage avec une colle de haute performance (Araldite AW 106 et durcisseur HV 953 U).

2.3. Intérêt de la méthodologie

Lors de la propagation d'une onde de torsion, le matériau peut être considéré comme

ébranlé progressivement lors du passage de l'onde. Ceci a un intérêt évident dans l'étude d'un matériau laminé constitué de tranches successives de fibres de verre et de résine.

Les vitesses de déformation obtenues varient de 100 à 5000 s^{-1} , et les temps de montée de l'onde de 20 à 30 μs , selon la nature du matériau testé et le couple de pré-torsion imposé.

Cette méthodologie permet d'effectuer des essais sur des matériaux anisotropes tels que monocristaux et composites à fibres. Dans ce cas, la géométrie des échantillons est parallélépipédique. La direction de cisaillement étant une direction privilégiée du matériau.

2.4. Interprétation des résultats

Les essais de cisaillement dynamique permettent donc d'obtenir la vitesse de déformation et la contrainte dans l'échantillon en fonction du temps. Par intégration, on peut obtenir alors la déformation, d'où la courbe contrainte-déformation. Les premiers résultats ont été obtenus sur le composite à tissu de verre équilibré à résine 470-36. La figure 5 montre les courbes "contrainte-déformation" obtenues sur trois types d'échantillon (fig. 3). On voit que la contrainte maximale (τ_{max}) est fortement sensible à la vitesse de déformation, sauf pour les courbes suivantes : n°5 (type I), n°5, 7 (type II) et n°5, 7 (type III) qui seront expliquées par l'allure de l'endommagement dans le paragraphe III. La figure 6 présente τ_{max} en fonction de $\dot{\gamma}$. On constate une certaine linéarité pour les trois types d'échantillons. Il semble que l'entaille n'influence pas fortement le comportement mécanique des échantillons. Pour cette raison, nous poursuivrons les essais sur d'autres composites avec la forme d'échantillons du type III.

III - EXPLICATION DU COMPORTEMENT ET ANALYSE DE L'ENDOMMAGEMENT

Les essais ont été effectués sur les composites I et II. La géométrie des échantillons est du type III.

3.1. Résultats expérimentaux

La figure 7 montre les courbes contrainte-déformation en dynamique et en quasi-statique. Chaque courbe est la moyenne de trois essais (soit 6 échantillons). Les contraintes maximum pour les composites testées ont presque les mêmes valeurs. La déformation de cisaillement pour le composite II est plus importante que celle du composite I. Ceci reste à expliquer par l'étude du comportement dynamique de ces deux résines pures. Il est à noter que les contraintes dans les essais quasi-statiques ne sont pas les contraintes maximum dans le composite à cause du collage insuffisant entre l'échantillon et les brides. On voit aussi une même allure d'augmentation de la contrainte maximum en fonction de la vitesse de déformation pour les deux composites, sauf dans les courbes n°3. Il convient d'analyser l'endommagement des échantillons pour expliquer ce phénomène.

3.2. Analyse de l'endommagement

Nous proposons dans le tableau 2 des schémas représentatifs de l'endommagement correspondant aux courbes de la figure 7. Nos essais n'ont jamais mené à la rupture dans la direction du cisaillement, mais à un endommagement avec fissuration de plus en plus important avec l'augmentation de $\dot{\gamma}$ et γ . Quand la vitesse de déformation dépasse une valeur critique ($\dot{\gamma}_{cr} \approx 2000 s^{-1}$ pour ces deux composites), le mode d'endommagement dans les échantillons est une fissuration dans les couches de tissu et un délaminage entre deux couches de tissu. Ceci explique pourquoi les contraintes maximales sont décroissantes pour les courbes citées antérieurement : n°5 (type I) n°5, 7 (type II) et n°5, 7 (type III) sur la figure 6 ; n°3 sur la figure 8.

IV. DISCUSSION ET CONCLUSION

A l'issue des premiers résultats expérimentaux, il apparaît que les paramètres tels que la vitesse de déformation $\dot{\gamma}$, la température des essais T , l'élévation de tempé-

Fig. 1 - Barre de Kolsky modifiée pour la torsion

Fig. 2 - Relation entre les couples de torsion

Fig. 3.a - Echantillon non entaillé

Fig. 3.b - Echantillon entaillé

Tableau 1 : géométrie des échantillons

Echantillons	Type	h_1 (mm)	h_2 (mm)	h_3 (mm)
non-entaillés	I	3,2	10,8	2,8
entaillés	II	3,2	8,8	3,2
	III	3,2	6,8	3,2

Fig. 4 - Encastrement des échantillons parallélépipédiques

Fig. 5 - Courbes de contrainte-déformation, composite I.

Fig. 6 - Influence de la vitesse de déformation sur la contrainte de cisaillement maximale.

Fig. 7 - Courbes contrainte-déformation moyennes

Tableau 2 : Endommagement représentatif

Mode de sollicitation		Déformation (%)		Endommagement représentatif	Allure d'endommagement
		Compo-site I	Compo-site II		
quasi-statique		10~20	20~30		très faible fissuration
Dynamique	$\dot{\gamma}$ faible	30~40	30~50		faible fissuration
	$\dot{\gamma}$ intermédiaire				fissuration importante
	$\dot{\gamma}$ très importante ($\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_{cr}$)				fissuration et délamination

rature ΔT en cours de déformation plastique de la résine et le cisaillement interlamellaire sont prédominants dans le comportement aux chocs des matériaux composites. Nous proposons qu'un modèle général devrait être mis sous la forme : $\tau = A \ln \dot{\gamma} + B f(T, \Delta T) + \phi$ où A et B sont des constantes; ϕ une fonction de tous les autres paramètres physiques, chimiques et mécaniques. Au-dessous de $\dot{\gamma}_{cr}$, les influences de $B f(T, \Delta T)$ et de ϕ sont négligeables devant $A \ln \dot{\gamma}$. Il est très difficile actuellement de déterminer quantitativement l'influence de la vitesse de sollicitation. Il faut également noter que les essais ne sont pas reproductibles exactement et que la dispersion des valeurs impose de faire de nombreux essais pour quantifier le phénomène statistiquement.

Cette méthodologie s'adapte bien à l'étude du phénomène de décohésion localisée (fissuration et délamination) car il est possible de relier les phénomènes d'endommagement du matériau à ses propriétés mécaniques. Ceci nous conduira à tester des composites à fibres unidirectionnelles de verre et les résines pures. Les résultats nous permettront de bien comprendre les mécanismes tels que le délamination, la décohésion des fibres, les fissures translaminaires, et de proposer des modèles pratiques applicables au calcul des structures.

REFERENCES

- /1/ F. Devries et F. Lene, Rapport G.R.E.C.O. n°115 (1984).
- /2/ C.Y. Chiem, J.P. Ramousse et R. Cozic, Convention E.N.S.M./C.E.T.I.M., Rapport n°CRC/8407-1 (1984).
- /3/ J. Duffy, J.D. Campbell and R.H. Hawley, J. of Applied Mechanics (Mars 1971), pp. 83-91.
- /4/ C.Y. Chiem, Thèse de Docteur-ès-Sciences Etat (Juin 1980).
- /5/ C.Y. Chiem, P. Blinot, R. Cozic, J.P. Dubois, Rapport Technique n°CMI-83-X15 (Mai 1983).
- /6/ C.Y. Chiem et J. Duffy, J. Mat. Sci. and Eng., vol. 57 (1982), n°2, pp. 233-247.