

## REALISATION CORRECTE DES ESSAIS MECANIQUES SUR LES COMPOSITES STRATIFIES A RENFORTS TISSU

TRAN ICH THINH  
*Institut Polytechnique de Hanoi*

RESUME. On se propose de définir une méthodologie expérimentale pour la réalisation correcte des essais mécaniques sur les matériaux composites à hautes performances. Une nouvelle technique d'essai a été mise au point; l'homogénéité du champ des déformations des éprouvettes est assurée par une procédure de test de validation; une méthode de calcul du tenseur de déformations prend en compte l'orientation exacte des jauges, ainsi que leurs sensibilités transversales réelles.

### §1. INTRODUCTION

La détermination des constantes matérielles élastiques, ainsi que l'étude expérimentale du comportement mécanique et de l'endommagement du matériau composite à l'aide d'essais mécaniques sont fortement influencées par la technique d'essai utilisée, par la forme géométrique et les dimensions des éprouvettes testées. Dans l'étude publiée par Asit [1] pour le compte de l'ASTM, différents laboratoires ont testé, à l'aide d'une même méthode d'essai, des échantillons carbone/expoxyde provenant d'une plaque unique. Les écarts entre les données expérimentales obtenues (27% pour la contrainte à la rupture) sont uniquement dûs aux différences opératoires entre les laboratoires pour la découpe et la préparation des échantillons et la mise en œuvre du test.

De nombreux chercheurs étudient ce problème dans l'objectif de trouver des méthodes d'essais appropriées. Les techniques présentées ci-dessous permettent d'éliminer partiellement certains problèmes dûs à l'anisotropie et la non homogénéité de ces matériaux et de contrôler la validité des résultats obtenus.

### §2. GENERALITE SUR LA STRUCTURE DU MATERIAU ET SES CONSEQUENCES

Le matériau utilisé dans nos études expérimentales est le composite tissu de verre/résine époxyde présentant sous forme de plaques (12 plis d'épaisseur 3,2 mm, pour les essais en traction; 32 plis d'épaisseur 8,5 mm, pour les essais en compression).

Le tissage taffetas, à composition pondérale 50%/chaîne/50%/trame, résulte, en principe, en un composite équilibré, c'est à dire présentant les mêmes propriétés mécaniques dans le sens chaîne et dans le sens trame. Nous avons effectivement observé dans notre étude expérimentale [3] que les résistances en traction simple et en compression simple dans le sens trame sont inférieures d'environ 10% par rapport à celles dans le sens chaîne; les modules sens trame sont inférieurs d'environ 2% à 4% par rapport aux modules sens chaîne; enfin, les déformations à la rupture sont inférieures dans le sens trame, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau (page 45).

### §3. DESCRIPTION DES MONTAGES ET EPROUVETTES

Les éprouvettes ont été usinées suivant 6 orientations différentes entre l'axe de l'échantillon et l'orientation des chaînes du tissu ( $\theta = 0^\circ; 7,5^\circ; 15^\circ; 30^\circ; 45^\circ$  et  $90^\circ$ ).

#### 3.1. Traction

Nous avons étudié une nouvelle forme de l'éprouvette. Les têtes, de section  $3 \times 35 \text{ mm}^2$  (pour  $\theta = 0^\circ; 7,5^\circ; 15^\circ$  et  $90^\circ$ ) et de  $3 \times 30 \text{ mm}^2$  (pour  $\theta = 30^\circ$  et  $45^\circ$ ), sont raccordées à la partie centrale par des congés de rayon 170 mm (usinés à l'aide d'une fraise au carbure spéciale fabriquée par nous-mêmes). La section utile est de  $3 \times 8 \text{ mm}^2$  ( $\theta = 0^\circ; 7,5^\circ; 15^\circ$  et  $90^\circ$ ) et de  $3 \times 10 \text{ mm}^2$  (pour  $\theta = 30^\circ$  et  $45^\circ$ ); longueur totale: 225 mm; longueur de la partie utile: 40 mm.

Avec cette nouvelle forme des éprouvettes, les premières essais ont données entière satisfaction: rupture par traction dans la partie centrale utile.

#### 3.2. Montage de traction

Un nouveau dispositif consiste à transmettre la charge axiale par l'intermédiaire de couteaux fixés sur les deux faces aux extrémités de l'éprouvette: montage en "rotules ponctuelles" (figure 1). Avec ce dispositif, les têtes de l'éprouvette peuvent tourner librement autour de la normale au plan de l'éprouvette; il permet d'éviter la déformation en "S" et d'obtenir, au cours des essais "hors-axes", un champ de déformations et un champ de contraintes homogènes dans la quasi-totalité de la partie utile de l'échantillon [2].

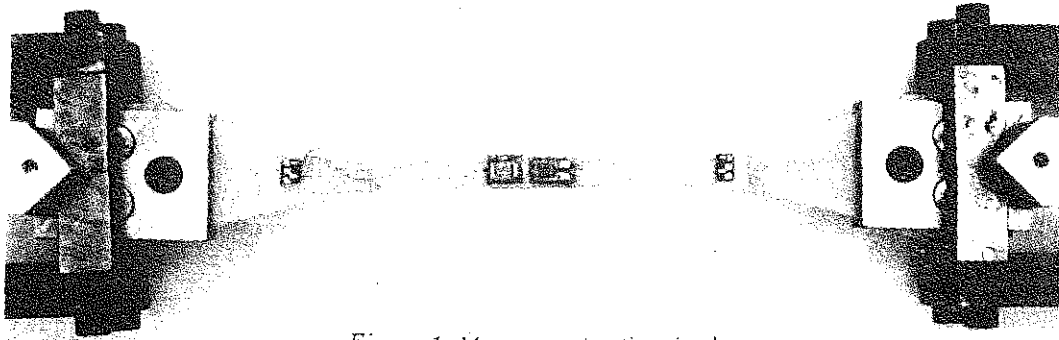


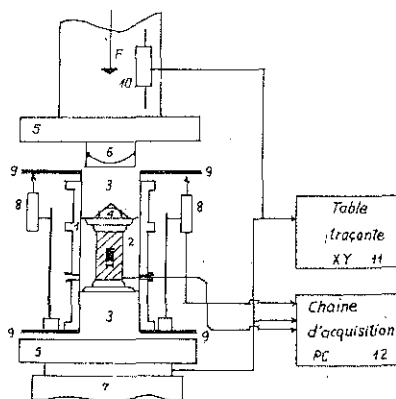
Figure 1. Montage en traction simple

#### 3.3. Compression

Nous avons usiné dans des plaques de composite des échantillons de forme parallélépipédique, de dimensions:  $8,5 \times 15 \times 60 \text{ mm}^3$  pour  $\theta = 0^\circ; 7,5^\circ; 15^\circ$  et  $30^\circ$ ;  $8,5 \times 15 \times 50 \text{ mm}^3$  pour  $\theta = 45^\circ$ .

#### 3.4. Montage de compression simple

Nous avons réalisé les essais de compression simple sur une machine d'essai servohydraulique SCHENCK 1000KN. Le montage est présenté sur la figure 2.



1. corps de la cellule
2. éprouvette
3. piston de la cellule
4. pièce de centrage
5. plateaux de compression de la machine d'essai
6. rotule sphérique
7. capteur de force
8. capteurs de déplacements inductifs
9. plateaux portant les capteurs de déplacement
10. capteur de déplacement du vérin
11. table traçante
12. chaîne d'acquisition

Figure 2. Montage en compression simple

## §4. MESURES DES DEFORMATIONS

Pour la détermination du tenseur des déformations, nous avons utilisé des jauges d'extensométrie et des capteurs de déplacement.

### 4.1. Traction simple

Pour les essais "dans les axes" et les essais "hors-axes" à  $45^\circ$ , les directions principales des déformations coïncident avec les axes de l'éprouvette: pour déterminer le tenseur des déformations dans le plan de l'éprouvette, il suffit donc de mesurer les déformations longitudinales et transversales. Pour les essais "hors-axes" à  $\theta = 7,5^\circ$ ;  $15^\circ$  et  $30^\circ$ , les directions principales des déformations ne sont pas connues a priori; il est donc nécessaire de disposer de trois mesures indépendantes; nous avons choisi de mesurer les déformations longitudinales, transversales et à  $45^\circ$  de l'axe de l'éprouvette.

### 4.2. Compression simple

Pour les éprouvettes "dans les axes", orientées à  $\theta = 0^\circ$  et  $90^\circ$ , nous avons disposé une jauge longitudinale et une jauge transversale sur chaque face (a) et (b) parallèle au tissu, ainsi qu'une jauge transversale sur les deux faces perpendiculaires, soit un total de 6 jauges.

Pour les éprouvette "hors-axes", orientées à  $\theta = 7,5^\circ$ ;  $15^\circ$  et  $30^\circ$ , sur chacune des faces parallèles au tissu, nous avons disposé une jauge longitudinale, une jauge transversale et une jauge à  $45^\circ$ , soit un total de 6 jauges.

Pour les éprouvettes "hors-axes" à  $45^\circ$ , nous avons disposé une jauge longitudinale et une jauge transversale sur chaque face parallèle au tissu, soit un total de 4 jauges.

## §5. HOMOGENEITE DU CHAMP DES DEFORMATIONS

Le champ des déformations en compression est souvent perturbé par des effets de plexion parasite, provoquée par une insuffisance de la précision de l'usinage des éprouvettes (les faces d'appui doivent être planes et parallèles, et perpendiculaires aux faces latérales) et/ou par un défaut d'alignement des différentes parties du montage expérimental.

Homogénéité du champ des déformations peut être vérifiée à partir des réponses des différentes jauges disposées sur des faces opposées de l'éprouvette. Ainsi, avant la réalisation de chaque essai de compression simple, nous avons procédé à un test de validation suivant la procédure décrite ci-dessous.

L'éprouvette est chargée en compression jusqu'à une déformation axiale comprise entre 0,05% et 0,1%, puis déchargée. Les signaux des jauges et du capteur de force sont traités et enregistrés par la centrale d'acquisition de données, puis transférés sur un ordinateur pour le tracé des courbes. Si l'écart entre les réponses de deux jauges de même orientation (jauges axiales ou jauges transversales ou jauges à  $45^\circ$ ) disposées sur deux faces opposées de l'éprouvette est trop important, il faut d'abord procéder à une rectification du montage et refaire le test de validation: si le test est toujours mauvais, il faut démonter l'éprouvette et procéder à une meilleure rectification des faces d'appui. L'essai de compression n'est réalisé qu'après l'obtention d'un test de validation acceptable.

Un exemple de cette procédure est illustré sur les figures 3.a) et b) pour une éprouvette orienté à  $45^\circ$ . Sur la figure 3.a, nous observons que les réponses des deux jauges transversales sont pratiquement confondues, mais que l'écart entre les réponses de deux jauges axiales est trop grand. Après démontage de l'éprouvette et rectification de ses fascas d'appui, le test de validation est acceptable (figure 3.b) et l'essai de compression simple peut être effectué.

Grâce à cette procédure de test de validation, nous avons obtenu une bonne homogénéité du champ des déformations jusqu'à la rupture des éprouvettes. Nous présentons sur la figure 4 les courbes des réponses des jauges en fonction de la contrainte axiale, pour l'éprouvette orientée à  $\theta = 30^\circ$ . Nous observons une très bonne superposition des réponses de chaque couple de même orientation et disposées sur deux faces opposées de l'éprouvette.

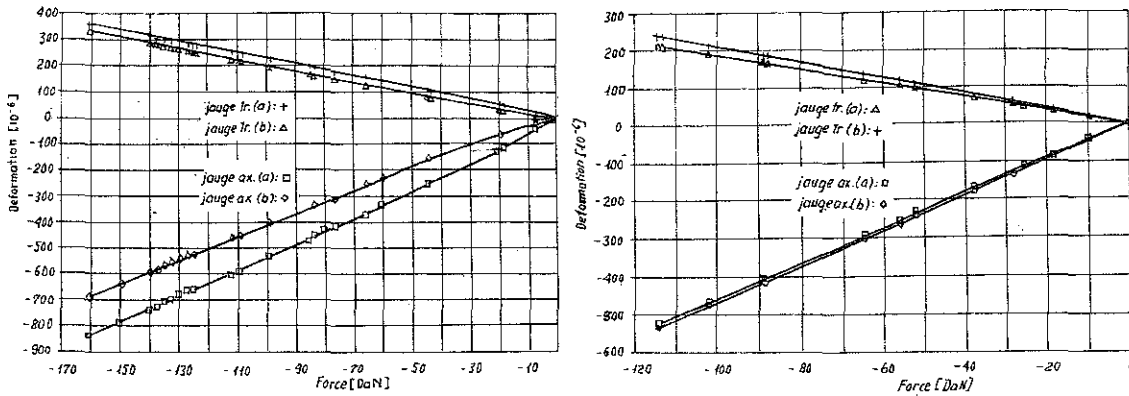


Figure 3. Test de validation d'un essai de compression simple  $\theta = 45^\circ$   
 a) Eprouvette et/ou montage à rectifier; b) Eprouvette et montage correcte

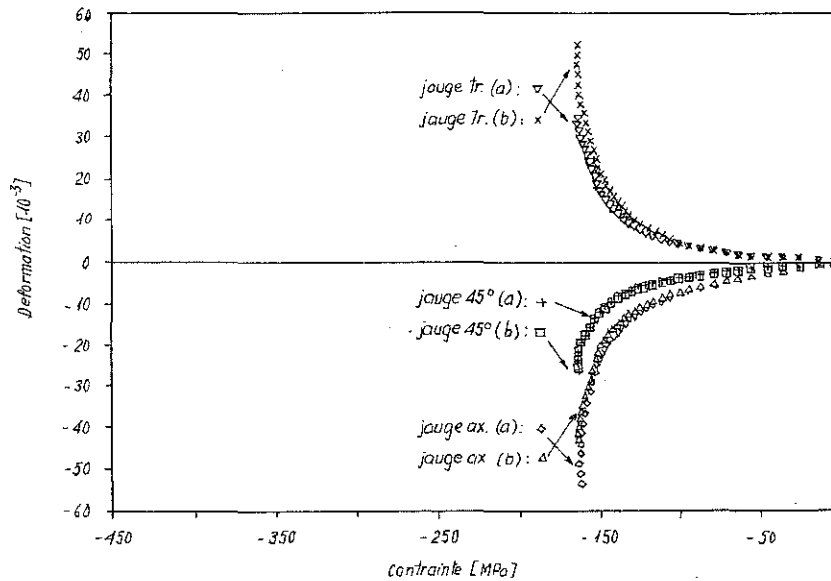


Figure 4. Réponse des jauges en compression simple,  $\theta = 30^\circ$

## §6. DEPOUILLEMENT DES MESURES

Les mesures brutes obtenues à partir des signaux des jauges d'extensométrie doivent être corrigées en tenant compte des perturbations suivantes:

- + effet transversal des jauges;
- + erreurs d'orientation des jauges par rapport aux axes de l'éprouvette;
- + non-linéarité du pont d'extensométrie est corrigée automatiquement;
- + effet de température est négligeable.

### 6.1. Erreur d'orientation des jauges

Une mauvaise orientation des jauges, provoquée lors du collage, peut être à l'origine d'erreur de mesure très importante.

Examinons d'abord le cas d'un chargement uniaxial dans une direction  $\epsilon_1$ . Soit  $\alpha$  l'angle que fait la direction souhaitée de la jauge "j" avec la direction  $\epsilon_1$  de chargement; soit  $\gamma$  l'erreur d'orientation par rapport à cette direction théorique (cf. figure 5).

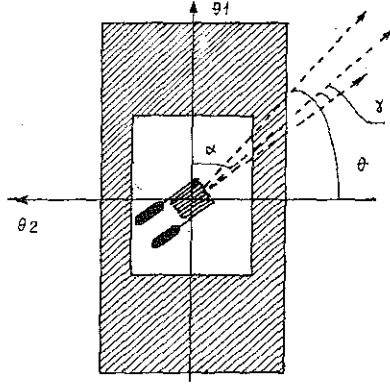


Figure 5. Erreur d'orientation des jauges

La relation qui lie la déformation que l'on désire mesurer  $\varepsilon(\alpha)$  avec les composantes  $\varepsilon_{11}$ ,  $\varepsilon_{22}$  et  $\varepsilon_{12}$  du tenseur des déformations dans le repère  $(\underline{e}_1, \underline{e}_2)$  est donnée par:

$$\varepsilon(\alpha) = \varepsilon_{11} \cos^2 \alpha + \varepsilon_{22} \sin^2 \alpha - 2\varepsilon_{12} \cos \alpha \sin \alpha. \quad (6.1)$$

La déformation mesurée réellement par la jauge "j" s'exprime d'une manière similaire:

$$\varepsilon_j(\alpha + \gamma) = \varepsilon_{11} \cos^2(\alpha + \gamma) + \varepsilon_{22} \sin^2(\alpha + \gamma) - 2\varepsilon_{12} \cos(\alpha + \gamma) \sin(\alpha + \gamma). \quad (6.2)$$

L'erreur relative commise par la mesure de  $\varepsilon_j(\alpha + \gamma)$  s'exprime par:

$$\begin{aligned} \eta_\alpha(\gamma) &= \frac{\varepsilon(\alpha) - \varepsilon_j(\alpha + \gamma)}{\varepsilon(\alpha)} = \quad (6.3) \\ &= \frac{\varepsilon_{11}[\cos^2 \alpha - \cos^2(\alpha + \gamma)] + \varepsilon_{22}[\sin^2 \alpha - \sin^2(\alpha + \gamma)] + 2\varepsilon_{12}[\sin \alpha \cos \alpha - \sin(\alpha + \gamma) \cos(\alpha + \gamma)]}{\varepsilon_{11} \cos^2 \alpha + \varepsilon_{22} \sin^2 \alpha - 2\varepsilon_{12} \sin \alpha \cos \alpha} \end{aligned}$$

D'après la théorie d'élasticité pour le matériau orthotrope [2], on obtient:

$$\varepsilon_{11} = A(\theta)\sigma; \quad \varepsilon_{22} = B(\theta)\sigma; \quad \varepsilon_{12} = C(\theta)\sigma, \quad (6.4)$$

où  $\sigma$  est la contrainte axiale appliquée et:

$$\begin{aligned} A(\theta) &= \left[ \frac{1}{E_1} \cos^4 \theta + \frac{1}{E_2} \sin^4 \theta + 2 \left( \frac{1}{2G_{12}} - \frac{\nu_{12}}{E_1} \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta \right] \\ B(\theta) &= \left[ -\frac{\nu_{21}}{E_1} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) + \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} + \frac{1}{E_1} \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta \right] \\ C(\theta) &= \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{1 + \nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{2G_{12}} \right) \cos^2 \theta - \left( \frac{1 + \nu_{21}}{E_2} - \frac{1}{2G_{12}} \right) \sin^2 \theta \right] \sin 2\theta \end{aligned} \quad (6.5)$$

L'erreur relative admet finalement l'expression:

$$\eta_\alpha(\gamma) = \frac{[A(\theta) - B(\theta)][\cos^2(\alpha + \gamma) - \cos^2 \alpha] - C(\theta)[\sin 2(\alpha + \gamma) - \sin 2\alpha]}{A(\theta) \cos^2 \alpha + B(\theta) \sin^2 \alpha - 2C(\theta) \sin \alpha \cos \alpha}. \quad (6.6)$$

Dans nos essais de traction, le positionnement des jauges a été vérifié à l'aide d'un cathétomètre avec précision de  $\pm 0,1\%$ ; l'erreur d'alignement  $\gamma$  est en moyenne inférieure à 1 degré. Pour l'éprouvette à  $30^\circ$  en composite étudié, nous obtenons:

$$\eta_{j0}(1^\circ) = 0,04\%; \quad \eta_{j90}(1^\circ) = 0,25\%; \quad \eta_{j45}(1^\circ) = 5\%$$

Ces erreurs sont très faibles à 0° et 90° mais non négligeable à 45°.

## 6.2. Calcul du tenseur de Cauchy-Green droit total

Le pont d'extensométrie indique une déformation fictive  $\Delta L/L_0$  obtenue par:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{1}{F} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (6.7)$$

où  $\Delta R/R$  est la variation de résistance de la jauge et  $F$  le "facteur de jauge" indiqué par le fabricant. En raison de l'effet transversal des jauges, la déformation axiale  $\Delta \ell/\ell_0$  vraie est donnée par:

$$F_a \cdot \frac{\Delta \ell}{\ell_0} + F_t \cdot \frac{\Delta b}{b_0} = F \cdot \frac{\Delta L}{L_0}, \quad (6.8)$$

où  $\Delta b/b_0$ : la déformation transversale,  $F_a$  et  $F_t$  sont respectivement les facteurs de jauge axial et transversal.

Pour la prise en compte de l'effet transversal, le fabricant de jauges n'indique qu'un coefficient de la sensibilité transversale relative  $K_t$ , défini par:

$$K_t = \frac{F_t}{F_a}. \quad (6.9)$$

Le facteur de jauge  $F$  est mesuré par le fabricant à l'aide d'un essai de traction (compression) simple sur un matériau isotrope ayant un coefficient de Poisson  $\nu_0$ . Le facteur  $F$  calculé correspondant à l'égalité entre la déformation axiale fictive  $\Delta L/L_0$  dans le sens de la traction et la déformation vraie  $\Delta \ell/\ell_0$ . Il en résulte que dans les conditions d'essai du fabricant, le facteur  $F$  prend déjà en compte l'effet transversal: la déformation transversale étant  $\Delta b/b_0 = -\nu_0 \Delta \ell/\ell_0$ , il vient, à partir de (6.8), (6.9):

$$F_a \cdot \frac{\Delta \ell}{\ell_0} - \nu_0 K_t F_a \cdot \frac{\Delta \ell}{\ell_0} = F \cdot \frac{\Delta \ell}{\ell_0}. \quad (6.10)$$

Nos conditions d'essai étant différentes de celles du fabricant, il est nécessaire de dissocier le facteur axial et le facteur transversal, il vient, à partir de (6.9), (6.10):

$$F_a = \frac{F}{(1 - \nu_0 K_t)}; \quad F_t = \frac{F \cdot K_t}{(1 - \nu_0 K_t)}. \quad (6.11)$$

Les déformations vraies mesurées allant jusqu'à 12%, nous nous plaçons dans la cinématique en grandes déformations. Nous présentons ci-dessous le calcul de la partie plane du tenseur de Cauchy-Green droit total (tenseur  $\tilde{C}$ ) correspondant à la déformation totale.

En petites déformations, les longueurs d'un élément matériel dans la configuration initiale et dans la configuration déformée sont voisines. Dans le calcul des composantes du tenseur de déformations, on peut se rapporter à la géométrie matérielle initiale ou à la géométrie déformée: l'erreur commise est négligeable (du deuxième ordre).

En grandes déformations, les deux configurations conduisent à des valeurs et des concepts de déformations différents, et il est donc nécessaire de préciser laquelle des deux configurations est choisie comme référence. Si les déformations sont définies par rapport à la configuration initiale, on obtient la description Lagrangienne de la cinématique, si elles sont définies dans la configuration déformée, on obtient la description Eulérienne.

Considérons un vecteur  $d\tilde{X}$  dans la configuration initiale, transformée par  $\tilde{P}$  en un vecteur  $d\tilde{x}$  dans la configuration déformée. Soit  $dS$  et  $ds$  les longueurs respectivement de  $d\tilde{X}$  et  $d\tilde{x}$ . La définition de l'allongement dans la direction du vecteur  $d\tilde{X}$  est:

$$\varepsilon = \frac{ds - dS}{dS} = \frac{ds}{dS} - 1 \quad (6.12)$$

En utilisant le tenseur Lagrangien de Cauchy-Green droit défini par:

$$\underset{\sim}{C} = \underset{\sim}{P}^T \underset{\sim}{P} \quad (6.13)$$

(tenseur Eulérien de Cauchy-Green gauche est défini par:  $\underset{\sim}{B}^{-1} = (\underset{\sim}{P}^{-1})^T \underset{\sim}{P}^{-1}$ ), on obtient:

$$\begin{aligned} d\underset{\sim}{x} \cdot d\underset{\sim}{x} &= (ds)^2 = d\underset{\sim}{X} \cdot \underset{\sim}{C} \cdot d\underset{\sim}{X} \\ (ds/dS)^2 &= \underset{\sim}{N} \cdot \underset{\sim}{C} \cdot \underset{\sim}{N}, \quad \text{avec } \underset{\sim}{N} = (d\underset{\sim}{X}/dS) \end{aligned} \quad (6.14)$$

où  $\underset{\sim}{N}$  est le vecteur unitaire dans la direction de  $d\underset{\sim}{X}$ . L'allongement s'exprime en fonction du tenseur  $\underset{\sim}{C}$  par:

$$\varepsilon_N = \sqrt{\underset{\sim}{N} \cdot \underset{\sim}{C} \cdot \underset{\sim}{N}} - 1 \quad (6.15)$$

Les formules classiques de dépouillement des jauges ont été établies dans l'hypothèse des petites déformations; dans ce cas les allongements des éléments matériels sont, au premier ordre, des composantes du tenseur de petites déformations. Ceci n'étant plus vrai en grandes déformations, une procédure spécifique pour la détermination d'un tenseur de grandes déformations, par exemple le tenseur de Cauchy-Green droit, doit être établie. Soit  $\underset{\sim}{N}$  et  $\overline{\underset{\sim}{N}}$  respectivement le vecteur unitaire dans la direction axiale et le vecteur unitaire dans la direction transversale de la jauge; les allongements réels  $\Delta\ell/\ell_0$  dans le sens axial et  $\Delta b/b_0$  dans le sens transversal peuvent s'exprimer par:

$$\Delta\ell/\ell_0 = \sqrt{\underset{\sim}{N} \cdot \underset{\sim}{C} \cdot \underset{\sim}{N}} - 1; \quad \Delta b/b_0 = \sqrt{\overline{\underset{\sim}{N}} \cdot \underset{\sim}{C} \cdot \overline{\underset{\sim}{N}}} - 1. \quad (6.16)$$

A partir de (6.8), (6.11) et (6.16), nous obtenons:

$$\sqrt{\underset{\sim}{N} \cdot \underset{\sim}{C} \cdot \underset{\sim}{N}} + K_t \sqrt{\overline{\underset{\sim}{N}} \cdot \underset{\sim}{C} \cdot \overline{\underset{\sim}{N}}} - (1 + K_t) = (1 - \nu_0 K_t) \cdot \Delta L/L_0 \quad (6.17)$$

où, pour chaque jauge "j":

$$N = \begin{pmatrix} \cos \psi_j \\ \sin \psi_j \end{pmatrix}; \quad \overline{N} = \begin{pmatrix} -\sin \psi_j \\ \cos \psi_j \end{pmatrix}; \quad C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix}; \quad C_{12} = C_{21} \quad (6.18)$$

où  $\psi_j = (\alpha \pm \gamma)_j$  (cf. figure 5), nous obtenons pour chaque jauge "j" et à chaque instant de mesure une expression de l'allongement fictif ( $\Delta L_j/L_{0j}$ ) mesuré, en fonction des trois inconnues  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{22}$  et l'orientation initiale  $\psi_j$  de la jauge;  $j = 1, 2, 3$  correspondent à la jauge axiale, transversale et à 45°:

$$\begin{aligned} &\sqrt{C_{11} \cos^2 \psi_j + 2C_{12} \cos \psi_j \sin \psi_j + C_{22} \sin^2 \psi_j} - (1 + K_{tj}) + \\ &K_{tj} \cdot \sqrt{C_{11} \sin^2 \psi_j - 2C_{12} \cos \psi_j \sin \psi_j + C_{22} \cos^2 \psi_j} - (1 - \nu_0 K_{tj}) \Delta L_j/L_{0j} = 0. \end{aligned} \quad (6.19)$$

Pour les essais "hors-axes", il est nécessaire d'utiliser au moins trois jauges ayant des orientations différentes (0°, 90° et 45°). Nous obtenons ainsi un système de trois équations non linéaires

pour déterminer le tenseur  $\underset{\approx}{C}$ , dont la résolution est basée sur une linéarisation autour d'une solution estimée; la convergence vers la solution réelle peut être obtenue par une méthode itérative. Nous soulignons que cette méthode permet de prendre en compte l'orientation exacte des jauges, ainsi que leurs sensibilités transversales réelles, même si des jauges avec différentes sensibilités sont utilisés.

Pour les essais "dans les axes" et à 45°, nous avons  $C_{12} = 0$ ; les mesures obtenues à partir de deux jauges suffisent pour déterminer la partie plane du tenseur  $\underset{\approx}{C}$ .

Les composantes du tenseur Green-Lagrange  $\underset{\approx}{E}$  sont déterminées par:

$$\underset{\approx}{E} = \frac{1}{2} \cdot (\underset{\approx}{C} - \underset{\approx}{I}). \quad (6.20)$$

Tous ces calculs sont effectués par un programme en langage FORTRAN F77.

Les résultats numériques montrent que: les déformations à la rupture ( $\varepsilon_r$ ) calculées en grandes déformations (G.d.) sont plus élevées de 18% (sens chaîne en traction) et de 12% (sens chaîne en compression) par rapport à celles calculées en petites déformations (P.d.); les modules élastiques ( $E$ ) sont systématiquement inférieurs d'environ 5% (sens chaîne en traction) et de 6% (sens chaîne en compression) à ceux en petites déformations.

Tableau. Comparaison des caractéristiques mécaniques sens chaîne et sens trame

		Chaîne			Trame		
		G.d.	P.d.	Ecart(%)	G.d.	P.d.	Ecart(%)
Traction simple	$\sigma_r$ [MPa]	462	462	-	420	420	-
	$\varepsilon_r$ [%]	2,6	2,2	18	2,1	1,8	17
	E [MPa]	20871	21913	5	20580	21401	4
Compression simple	$\sigma_r$ [MPa]	412	412	-	380	380	-
	$\varepsilon_r$ [%]	1,8	1,6	12	1,6	1,45	10
	E [MPa]	28781	30506	6	27582	28458	3

## CONCLUSIONS

Les essais mécaniques sur les matériaux composites présentent des difficultés particulières. Celles-ci ne peuvent être résolues sans une méthodologie expérimentales soignée et correcte.

- Le montage en "rotules ponctuelles" permet d'obtenir, un champ de déformations et un champ de contraintes homogènes dans la quasi-totalité de la partie utile de l'échantillon en traction simple.

- La procédure de test de validation assure une bonne homogénéité du champ de déformations jusqu'à la rupture des éprouvettes en compression simple.

- La formule (6.19) construite par nous-mêmes permet de prendre en compte l'orientation exacte et les sensibilités transversales réelles des jauges dans les calculs des composantes du tenseur Cauchy-Green droit et du tenseur de Green-Lagrange.

Cet article est accompli à l'aide financière du Programme National de Recherches fondamentales.



## REFERENCES

1. Adsit N. R. Compression Testing of Graphite/epoxy. Compression Testing of Materials and Composite. ASTM STP 808. R. Chat and Papirno. Eds. American Society for Testing and Materials 1983, pp. 175-186.
2. Trần Ích Thịnh. Xác định thực nghiệm các đặc trưng cơ học vật liệu composite. Tuyển tập công trình khoa học Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ V, Hà Nội 12/1992, tập III, (173-179).
3. Trần Ích Thịnh. Nghiên cứu thực nghiệm ứng xử cơ học vật liệu composite vải thủy tinh/nhựa epoxy chịu lực phức tạp. Tuyển tập công trình khoa học Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ V, Hà Nội 12/1992, Tập III, (165-172).

*Nhận ngày 30/9/1993*

### THỰC HIỆN ĐÚNG ĐẮN THÍ NGHIỆM CƠ HỌC TRÊN VẬT LIỆU COMPOSIT NHIỀU LỚP CỐT VẢI

Bài báo đề cập đến một kỹ thuật thí nghiệm cơ học mới nhằm thu nhận trường ứng suất, biến dạng đồng nhất tại miền làm việc của các mẫu thử kéo và nén trên vật liệu composit dị hướng nhiều lớp cốt vải, có độ bền, độ cứng cao. Biểu thức xác định tenxơ biến dạng Cauchy-Green và Green-Lagrange được thiết lập theo lý thuyết biến dạng lớn cho phép tính toán các thành phần biến dạng thực của vật liệu thí nghiệm theo các góc thực tế và độ nhạy ngang của các cảm biến điện trở dán trên mẫu thử.

---

### ON THE SIMULATION TECHNIQUE ...

*(tiếp trang 31)*

2. Crandall S. H. and Zhu W. Q. Random Vibration: A survey of recent development. Trans. J. App. Mech. No 4b, 1983.
3. Crandall S. H. Perturbation techniques for random vibration of non-linear systems. J. Acoust. Soc. Amer. Vol. 35, No 11, 1963.
4. Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. Стройиздат, Москва 1982.
5. Бендат Д. Ж., Пирсон А. Прикладной анализ случайных данных. Изд. "Мир", Москва 1989.
6. Дименберг М. Ф. Нелинейные стохастические задачи механических колебаний. Изд. "Наука", Москва 1980.

*Received November 8, 1993*

### VỀ PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH NGẪU NHIÊN VÀ DAO ĐỘNG PHI TUYẾN

Trong bài báo này, chúng tôi trình bày phương pháp và chương trình mô phỏng quá trình ngẫu nhiên. Chương trình này được áp dụng cho hệ cơ học phi tuyến chịu kích động ngẫu nhiên dừng. Các kết quả thu được đã được đem so sánh với các kết quả trong các trường hợp có thể giải được bằng các phương pháp khác như phương pháp phương trình Fokker-Planck-Kolmogorov và tuyến tính hóa thống kê. Sự so sánh này đánh giá độ chính xác của chương trình mô phỏng đã trình bày.