



HAL
open science

Influence de l'orientation des fibres sur un essai Arcan = Influence of fiber orientation on Arcan test data

Papa-Birame Gning, Daniel Coutellier, David Delsart

► **To cite this version:**

Papa-Birame Gning, Daniel Coutellier, David Delsart. Influence de l'orientation des fibres sur un essai Arcan = Influence of fiber orientation on Arcan test data. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00392419

HAL Id: hal-00392419

<https://hal.science/hal-00392419>

Submitted on 11 Jun 2009

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.

Influence de l'orientation des fibres sur un essai Arcan

Influence of fiber orientation on Arcan test data

P. B. Gning^{1,3}, D. Coutellier¹, D. Delsart²

1 : LAMIH-UMR CNRS 8530
Université de Valenciennes – F - 59313 Valenciennes CEDEX 9
e-mail : daniel.coutellier@univ-valenciennes.fr

2 : ONERA-DMSE
F - 59045 Lille CEDEX
e-mail : david.delsart@onera.fr

3 : LRMA-ISAT
Université de Bourgogne – F - 58027 Nevers CEDEX
e-mail : papa-birame.gning@u-bourgogne.fr

Résumé

Ce papier présente les résultats d'une étude expérimentale portant sur le comportement d'éprouvettes 'papillon' en verre/époxy, soumises à des chargements de cisaillement pur et de traction-cisaillement combinés, au moyen d'un dispositif Arcan. Des éprouvettes dont les fibres sont orientées parallèlement à la direction des entailles et d'autres pour lesquelles les fibres sont perpendiculaires à cette direction, respectivement désignées Mat31 et Mat32, ont été testées pour différents angles de sollicitation, dans une plage comprise entre 0° et 90°.

Le mode de rupture observé pour les éprouvettes Mat31 est répétitif, alors qu'il dépend de la direction de la sollicitation pour les Mat32. Pour ces dernières, le nombre de fissures ainsi que leur inclinaison par rapport à la ligne des entailles, diminue à mesure que l'angle d'essai augmente. La comparaison des enveloppes de rupture, a montré que les éprouvettes Mat31 sont plus résistantes, quelque soit l'angle de chargement. Cependant, les contraintes à rupture des Mat32 sont en bonne cohérence avec le critère de rupture de Hashin, pour des essais en cisaillement pur et jusqu'à 30°. Les contraintes à rupture des Mat31 sont alors surestimées par le critère, bien que des tendances similaires soient notées pour les deux types d'éprouvettes.

Abstract

This paper presents results obtained from the experimental study of glass/epoxy butterfly-shaped specimens tested under pure shear and biaxial loadings using an upgraded Arcan setup. Notch-to-notch longitudinally oriented fiber specimens and perpendicularly oriented ones, respectively referred to as Mat31 and Mat32 specimens were tested with various loading positions over a range of 0° to 90°.

Fracture mode was the same for Mat31 specimens but depended on the loading direction for Mat32 type for which the number and obliqueness of cracks decreased as the test angle rose. The comparison of failure envelopes has demonstrated that Mat31 specimens were much more resistant whatever the loading angle. However, strengths at failure of Mat32 type were in good agreement with Hashin's failure criterion in pure shear test up to 30° loading angle. Mat31 specimens' failure stresses were overestimated, though similarities in trends were noticed.

Mots Clés : Fibre de verre, essai arcan, rupture, propriétés mécaniques

Keywords : Glass fiber; Arcan test; Fracture; Mechanical properties.

1. Introduction

Afin d'identifier les modules et contraintes à rupture en cisaillement des matériaux composites à renforts en fibres, plusieurs méthodes d'essai ont été développées avec différents niveaux de satisfaction. Parmi celles-ci, l'essai de traction d'éprouvettes droites, dont les fibres ont une certaine inclinaison par rapport à la direction de la sollicitation, est la technique la plus utilisée, en raison de sa facilité de mise en œuvre. Cependant, le module de cisaillement mesuré dans le plan de l'éprouvette par ce type d'essai, est influencé par les interactions entre les plis alternativement empilés à $\pm 45^\circ$ ou $\pm 67.5^\circ$. De la même manière,

l'essai de cisaillement sur rails pour des éprouvettes composites, permet la mesure des modules sens fibres et hors-plan. Toutefois, cette méthode présente certaines limitations, comme l'influence importante des supports sur l'uniformité de la distribution des contraintes dans le spécimen, tout autant qu'elle favorise l'émergence de moments de flexion dus aux chargements normaux générés par les rails. Ces limitations sont discutées par Whitney et al. dans [1]. On peut remarquer aussi, que ces deux précédentes méthodes ne permettent pas de caractériser les enveloppes de rupture dans les cas de chargements combinés.

D'autres types d'essais ont pour but l'identification des propriétés en cisaillement des composites unidirectionnels ainsi que la détermination de leur enveloppe de rupture. Les essais en pression interne ou externe couplés à un chargement axial, sur des cylindres à paroi fine, fabriqués généralement par enroulement filamentaire, permet la mesure de l'enveloppe de rupture de stratifiés à renforts de fibres, en faisant varier le rapport entre les contraintes axiales et circonférentielles [2]. Toutefois, un inconvénient majeur de cette méthode, est la difficulté de réalisation des essais, à quoi s'ajoute le fait que le procédé de l'enroulement filamentaire, crée un entrecroisement des mèches, qui génère une variation dans l'orientation des renforts lors de la fabrication des tubes. Cette variation d'angle, plus ou moins importante, croît à mesure que l'épaisseur augmente. Ainsi, la paroi du cylindre est davantage comparable à une structure tridimensionnelle tissée qu'à une stratification de plis élémentaires unidirectionnels. Ce constat met en exergue l'importance du choix de l'épaisseur du cylindre, dans la validité des mesures effectuées. La difficulté de trouver une corrélation forte entre les mesures biaxiales résultant d'essais de pression sur des cylindres composites et les prédictions issues des critères de rupture disponibles dans la littérature est abondamment discutée par Hinton et al. [3].

Un dispositif permettant la détermination des modules et valeurs à rupture en cisaillement pur a été proposé par Arcan et al. [4-5-6]. La géométrie des éprouvettes a été déterminée par photoélasticimétrie et leur forme en 'S' ou 'papillon', réduit les effets de flexion comparativement à l'essai Iosipescu, pour lequel la longueur de l'éprouvette peut être pénalisante [7]. La fidélité du dispositif a été validée par des essais sur des éprouvettes en aluminium et verre/époxy pour lesquelles les propriétés étaient préalablement connues. Ces tests ont été effectués dans le but d'identifier le module de cisaillement et l'enveloppe de rupture de spécimens en verre/époxy [5-6]. La présence des entailles dans les éprouvettes, génère une concentration de contraintes qui augmente à mesure que la composante de traction croît. C'est pour cette raison, que les auteurs, ont proposé une plage de validité des mesures, avec un tel dispositif, comprise entre $\pm 25^\circ$ autour de la configuration de cisaillement pur. Ceci correspond à un ratio de la contrainte normale aux plis et celle de cisaillement de ± 0.47 . Une interpolation sur les résultats a permis d'identifier les paramètres d'un critère de rupture de forme polynomiale, prenant en compte les valeurs en traction et compression. Cependant, seule l'enveloppe de rupture des éprouvettes avec fibres orientées parallèlement à la ligne des encoches a été présentée dans l'étude. On peut remarquer, en plus, que les paramètres interpolés mathématiquement, ne correspondent pas aux propriétés intuitives du matériau, résultant d'essais élémentaires tels que ceux de traction/compression et cisaillement, comme c'est le cas pour le critère de Tsai-Hill par exemple. Ceci conduit à une perte de généralité dans l'usage de l'expression. L'utilisation du dispositif Arcan a été étendue à la mesure quasi-statique, des taux de restitution d'énergie de spécimens en carbone/époxy préfiissurés, sollicités en mode I et II [8].

Dans une vaste étude, Hung et Liechti se sont intéressés à la mesure des modules de cisaillement et à la détermination de la géométrie, la plus appropriée, pour des éprouvettes à renforts en carbone et matrice thermoplastique, soumises à des essais Arcan [9-10]. Différents spécimens, ayant plusieurs orientations possibles, ont été découpés de plaques unidirectionnelles en AS4/PEEK. Les modules de cisaillement déterminés par interférométrie Moiré, ont été satisfaisants comparativement aux résultats issus de mesures par jauges de déformation. Dans l'ensemble, le module de cisaillement longitudinal (sens fibres/transverse) trouvé, apparut plus proche de celui entre sens fibres/hors-plan, tandis que le module sens transverse/hors-plan fut deux fois plus petit que les valeurs précédentes. En combinant, les résultats expérimentaux avec une analyse par éléments finis, les auteurs recommandent l'usage d'éprouvettes en forme 'papillon' avec une orientation des renforts parallèle à la direction des encoches, un angle 90° pour les entailles avec un rayon de 2.38 mm, comme étant la meilleure géométrie d'éprouvettes à renforts unidirectionnels, destinés à la mesure de modules de cisaillement par essai Arcan. Les spécimens doivent être collés aux mors de fixations [10]. Cette étude a aussi révélé, l'existence d'une distribution non linéaire des déformations dans la zone centrale des spécimens pour des niveaux de sollicitation élevés. Bien que plusieurs configurations d'éprouvettes aient été testées, la phénoménologie de leur rupture n'a pas été décrite, tout autant que leurs résistances et enveloppes de rupture, qui dépendent des composants du matériau ainsi que de l'orientation des renforts vis-à-vis de la direction de chargement.

Il résulte de cette revue non exhaustive, que le dispositif d'essai Arcan semble très approprié pour la détermination du module de cisaillement de matériaux à renforts de fibres. Ainsi, cette présente étude, vise une meilleure compréhension du comportement des composites unidirectionnels en verre/époxy, soumis à des sollicitations de cisaillement. En effet, deux types d'éprouvettes ont été testés. Pour le premier, les fibres sont orientées suivant la direction des encoches, tandis que pour le second, les fibres sont perpendiculaires à cette ligne. Dans les deux cas, les couches ont été empilées perpendiculairement la direction des mors de serrage. Les spécimens ont été sollicités en cisaillement pur, biaxial (traction et cisaillement couplés) et en

traction uniquement. La phénoménologie de la rupture en termes de mécanismes et niveaux d'efforts sont décrits. Finalement, l'utilisation simple du critère de rupture de Hashin, a révélé un léger accroissement du domaine de validité des données issues d'essais Arcan, pour la caractérisation d'enveloppes de rupture d'éprouvettes à fibres perpendiculaires à la direction des encoches.

2. Eprouvettes et dispositif d'essai

Les matériaux utilisés dans cette étude, sont fabriqués à partir d'un ruban unidirectionnel en verre E, préimprégné d'une matrice époxy. Les matériaux à base de fibres de verre sont particulièrement intéressants pour l'industrie du transport, en raison de leur grand ratio module/densité et de leur faible coût comparativement à d'autres. La résine utilisée est composée d'un pré polymère BE et d'un durcisseur M10 fournis par Hexcel Composites. Des barreaux d'éprouvettes ont été réalisés par empilement de 46 plis UD préimprégnés, cuits en autoclave. Chaque pli a une épaisseur de 0.74 mm avant cuisson. Le temps de polymérisation est de trois heures à une température moyenne de 120°C, donnant une barre stratifiée monolithique de 300 mm de long avec une épaisseur de 30 mm et une largeur de 42.3 mm. Après cuisson, les faces des barres sont usinées, de sorte à obtenir les éprouvettes schématisées dans Fig. 1, représentant respectivement, les deux types d'éprouvettes désignés Mat31 et Mat32 et utilisés dans l'étude, avec les dimensions indiquées.

La désignation des spécimens fait référence aux chiffres caractérisant, dans l'ordre, l'axe vertical et horizontal des plis, coïncidant avec les directions des vue de face des éprouvettes. La direction des fibres est repérée 1, la direction transverse 2 et la direction hors-plan 3. Pour le premier type de spécimen, les fibres sont orientées parallèlement à la ligne joignant les encoches et de façon orthogonale à cette direction pour le second type. En effet, les éprouvettes Mat31 et Mat32 sont usinées respectivement, de façon parallèle à la direction transverse des plis et parallèlement à la direction des fibres, par une fraise de forme qui laisse des encoches à 90° avec un rayon de 2.5 mm. La distance (d) entre les encoches est de 17.5 mm. Les barres usinées, sont débitées en éprouvettes, d'une épaisseur (e) de 5 mm, grâce à un disque de scie diamanté, lubrifié à l'eau. Les faces des spécimens ne sont pas polies après la découpe.

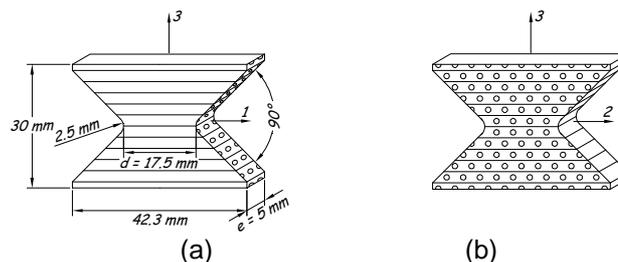


Fig. 1. Schématisation des éprouvettes Mat31 (a) et Mat32 (b) : dimensions, stratification et repérage des axes.

Le taux volumique de fibres déterminé par immersion d'éprouvettes dans l'eau, indique une valeur moyenne de l'ordre de 55%. Le taux de vide n'a pas été mesuré, mais semble acceptable au regard des observations sur le matériau, faites au MEB. Des études précédentes, concernant le même matériau, ont donné les propriétés élastiques et résistances limites suivantes pour le verre E/époxy, listées dans Tab. 1-2 [11-12-13].

E_{11}^t	E_{11}^c	E_{22}^t	E_{22}^c	G_{12}	ν_{12}	ν_{23}
45.4 GPa	43.4 GPa	10.9 GPa	10.1 GPa	4.4 GPa	0.297	0.3

Tab. 1. Propriétés élastiques du pli unidirectionnel en verre E/époxy.

X^t	X^c	Y^t	ϵ_{22}^c	S_{12}
1317 MPa	729 MPa	30 MPa	5.57%	55 MPa

Tab. 2. Résistances limites du pli unidirectionnel en verre E/époxy.

Les composites à renforts de fibres, offrent une meilleure résistance lorsqu'ils sont sollicités dans le plan des plis. Malheureusement, dans la plupart de leurs applications, automobiles ou ferroviaires, ces matériaux sont majoritairement soumis à des sollicitations orientées suivant une direction hors-plan. Aussi, l'objectif de cette étude, est de comparer les modules de cisaillement et de caractériser les enveloppes de rupture d'éprouvettes composites renforcés par des fibres de verre unidirectionnels, par cisaillement pur et combinaison de cisaillement et d'effort normal avec des vitesses de déformation quasi-statiques. Pour

atteindre cet objectif, le dispositif d'essai, schématisé dans Fig. 2, consistant en un appareil Arcan modifié muni de son éprouvette 'papillon', a été conçu préalablement par Devillers et Delsart [12-13].

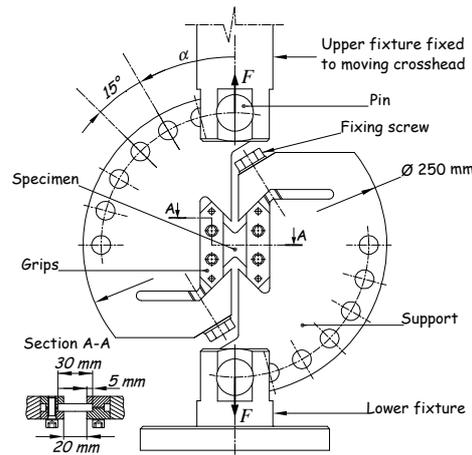


Fig. 2. Dispositif d'essai Arcan en mode de cisaillement pur.

Une analyse linéaire par éléments finis, a permis de s'assurer de la distribution uniforme des déformations au sein de la zone centrale des spécimens, lors du cisaillement. Les éprouvettes sont fixées sur deux plaques supports antisymétriques, d'épaisseur 20 mm, au moyen de deux paires de mors, distantes de 20 mm. Chaque paire de mors est positionnée de par et d'autre du spécimen, bridant une hauteur périphérique de l'éprouvette de 5 mm, grâce à deux petites vis serrées avec un couple de 10 Nm. Aucun adhésif n'est utilisé entre les mors et l'éprouvette. Afin d'éviter tout jeu possible, chaque paire de mors est emboîtée rigidement dans un support semi-circulaire à l'aide d'une vis de fixation. Après la fixation de l'éprouvette, l'ensemble est sollicité via deux axes, l'un fixé à la traverse mobile supérieure et l'autre solidaire du bâti d'une machine de traction universelle Instron, de capacité 10 kN. Tous les essais ont été réalisés avec la vitesse de déplacement de la traverse constante de 1 mm/min. L'appareillage présente un encombrement de 250 mm de diamètre. Une articulation est placée entre la plaque support supérieure et la traverse mobile, en vue de minimiser la transmission d'efforts et moments parasites, dus aux défauts d'alignement.

Les angles de sollicitation (α) sont compris entre 0° et 90° . Sept positions d'axes ont été usinées, par intervalle de 15° , sur chaque support, pour avoir le plus de positions d'essai possibles. Ceci a permis, en plus du chargement de cisaillement pur, correspondant à $\alpha = 0^\circ$, représenté sur la Fig. 2, d'effectuer des essais biaxiaux de cisaillement et traction combinés, en variant l'angle de sollicitation ($\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) et de traction pour $\alpha = 90^\circ$.

Des jauges de déformation (TML), longues de 5 mm et large de 3 mm, ont été collées au centre des éprouvettes. Lors des essais de cisaillement, une rosette de deux jauges, orientée à 45° par rapport à la ligne des encoches est collée. Les déformations de cisaillement correspondent à la différence entre les signaux mesurés par chacune des deux jauges. Pour les essais de traction, une seule jauge est placée sur l'éprouvette, suivant la direction des mors de serrage. Les mesures expérimentales sont enregistrées par un système d'acquisition Nicolet, avec une fréquence quasi-statique de 67 Hz.

3. Observations

Cinq éprouvettes Mat31 et Mat32 ont été testées pour chacune des sept positions, dans le but de vérifier la répétabilité des mesures. La moyenne de l'effort de rupture, son écart-type et les contraintes de cisaillement et de traction, pour toutes les positions couvrant le demi-espace des contraintes biaxiales, par intervalles de 15° , sont présentés dans Tab. 3. Les contraintes de cisaillement (σ_t) et de traction (σ_n) dépendent de la contrainte moyenne, calculée en divisant l'effort de rupture (F) par l'aire de la section significative ($d \cdot e$) et de l'angle de sollicitation (α) (eq. 1-2). Le dispositif ne permet uniquement que des chargements positifs.

$$\sigma_t = F \cdot \cos \alpha / (d \cdot e) \quad (\text{eq. 1})$$

$$\sigma_n = F \cdot \sin \alpha / (d \cdot e) \quad (\text{eq. 2})$$

On peut remarquer, au vu des résultats dans Tab. 3, que les éprouvettes Mat31 présentent des efforts moyens à rupture généralement supérieurs aux Mat32, pour toutes les configurations d'essai. Les écarts-types apparaissent satisfaisant compte-tenu des niveaux d'efforts atteints. Les essais de cisaillement, traction et cisaillement combinés et traction seule, sont décrits dans la suite. Ces trois cas de chargement sont suffisamment représentatifs du comportement du matériau et des mécanismes de rupture observés dans l'étude. Tous les tests sont réalisés jusqu'à rupture de l'éprouvette.

Angle d'essai (°)	Mat31			Mat32		
	Effort à rupture (N)	Contrainte de cisaillement (MPa)	Contrainte de traction (MPa)	Effort à rupture (N)	Contrainte de cisaillement (MPa)	Contrainte de traction (MPa)
0	4180 (732)	44.5	0	1680 (347)	18.9	0
15	2518 (370)	27.5	7.4	1773 (203)	19.2	5.1
30	2146 (472)	20.8	12.1	1841 (182)	18.03	10.4
45	2301 (143)	18.3	18.3	1783 (250)	14.1	14.1
60	2657 (750)	11.9	20.5	1603 (214)	9.1	15.7
75	1954 (208)	5.6	20.9	1777 (38)	5.2	19.5
90	3315 (315)	0	36.9	2432 (158)	0	27.5

Tab. 3. Résultats expérimentaux à rupture des éprouvettes Mat31 et Mat32. Valeurs moyennes et écarts-types entre parenthèses

3.1 Cisaillement pur

Trois courbes, représentant typiquement les réponses en force-déplacement des éprouvettes Mat31 et Mat32 sont superposées dans Fig.3. Dans la première partie des courbes, les spécimens Mat31 présentent un comportement identique, suivi par le développement d'une phase non-linéaire. Les efforts à rupture présentent une dispersion importante. Les éprouvettes Mat32 montrent un comportement élastique linéaire, jusqu'à une rupture fragile, sans activation d'effets non-linéaires. Les deux types de spécimens donnent des pentes similaires dans la partie élastique. L'effort moyen de rupture par cisaillement des Mat31 est de 60% plus élevé que les Mat32, malgré une relative importance des dispersions pour les premiers.

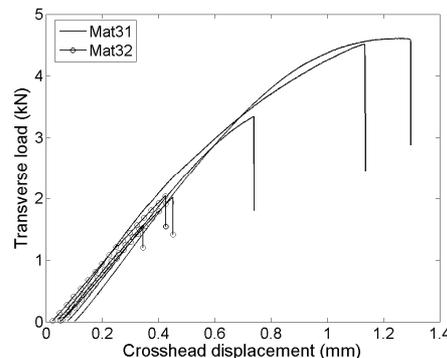


Fig. 3. Réponses force-déplacement en cisaillement pur ($\alpha = 0^\circ$).

Une seule surface de rupture interlaminaire, située dans le voisinage de la section significative, a été constatée sur les éprouvettes de type Mat31 (Fig. 4(a)). La phénoménologie de la rupture est complètement différente pour les spécimens Mat32. En effet, on distingue deux fissures opposées, qui s'initient au niveau des encoches et se propagent de façon oblique à travers l'éprouvette, vers le bord libre opposé ou les mors (Fig. 4(b)). Ces fissures intralaminaires, progressent en traversant successivement les plis et les interfaces. Aussi, la plupart des éprouvettes Mat32 se fissurent de trois fragments et le mécanisme de rupture est semblable à une ouverture en mode II. Pour les deux types de spécimens, une faible rotation des plaques supports est remarquée vers la fin de l'essai.

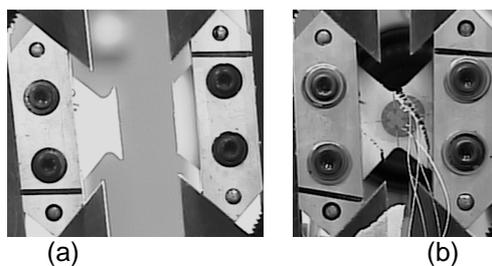


Fig. 4. Eprouvettes testées en cisaillement pur. Mat31(a) et Mat32(b).

3.2 Chargements combinés

Le mode de rupture sous sollicitations de traction et cisaillement combinés, dépend de la prépondérance de chacune des composantes et du type d'éprouvette. Pour les Mat31, plus le cisaillement est présent et plus la courbe force-déplacement présente un partie non-linéaire, relativement importante, jusqu'à la rupture, à la suite de la phase élastique. On le voit clairement dans Fig. 3-5(a) représentant les réponses d'éprouvettes Mat31, respectivement, dans les cas où $\alpha = 0^\circ$ et 15° . Pour des angles plus élevés ($30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$), les courbes restent linéaires jusqu'à la rupture fragile de l'éprouvette (Fig. 5(b-c-d)-7). Les courbes des Mat32 montrent un comportement uniquement linéaire, indépendamment de la direction du chargement (Fig. 3-5-7), mais cassent systématiquement, pour de niveaux d'efforts plus faibles (Tab. 3).

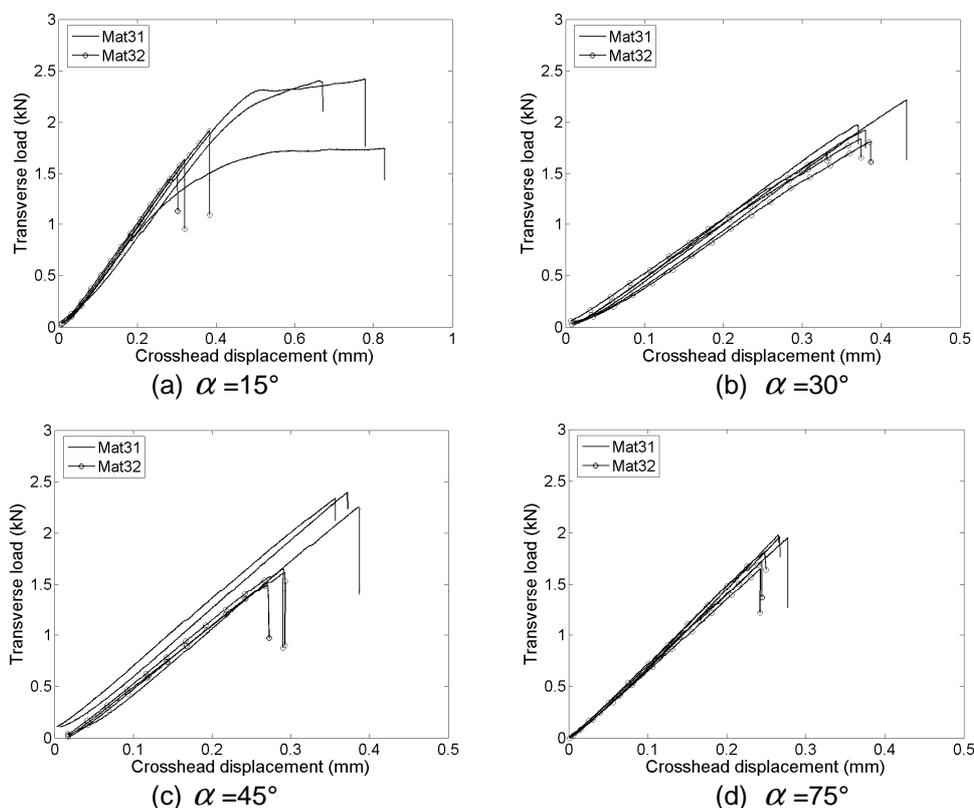


Fig. 5. Réponses force-déplacement en sollicitation combinée.

Une image de spécimen Mat31 rompue sous une sollicitation combinée à 45° , est présentée dans Fig. 6(a). Similairement aux cas de cisaillement pur, les éprouvettes se fissurent dans l'environnement de la section significative. La morphologie de la rupture est identique à celle d'éprouvettes Mat31 soumises au cisaillement pur (Fig. 4(a)). Pour les spécimens Mat32, le mécanisme de rupture consiste en une fissure traversant l'éprouvette, dans la zone d'encoche à encoche, partant d'un coté, vers la face opposée. Le chemin de rupture n'est pas rectiligne et les spécimens rompent en deux fragments (Fig. 6(b)). Plus l'angle d'essai augmente et moins les fissures dévient en direction des mors de fixation (Fig. 4(b)).

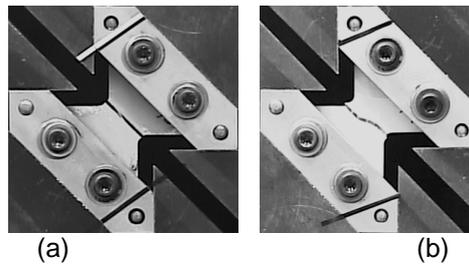


Fig. 6. Eprouvettes testées en chargement biaxial. Mat31(a) et Mat32(b) ($\alpha = 45^\circ$).

3.3 Essais de traction

Les courbes force-déplacement issues d'essais de traction quasi-statiques pour des éprouvettes Mat31 et Mat32 sont présentées dans Fig. 7. Pour toutes les mesures, les chemins de chargement sont linéaires jusqu'à une rupture brutale, correspondant à l'effort maximal atteint. Les tests montrent une bonne répétabilité jusqu'à rupture. La comparaison entre spécimens, montre des pentes similaires, bien que les échantillons Mat31 cassent pour des seuils de 27% supérieurs à ceux des Mat32.

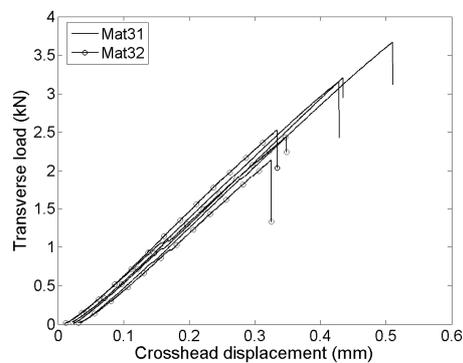


Fig. 7. Réponses force-déplacement en traction.

En raison des concentrations de contraintes importantes en fond d'encoche, la rupture des éprouvettes se produit généralement dans la section significative pour les deux types de spécimens [6]. La rupture des Mat31 se produit suivant une fissure localisée dans une seule interface (Fig. 8). Dans le cas de la traction, la rupture des éprouvettes Mat32, présente une fissure presque horizontale. En effet, l'ouverture se fait par le chevauchement d'une interface à l'autre et la surface de rupture n'est pas restreinte à une seule interface.

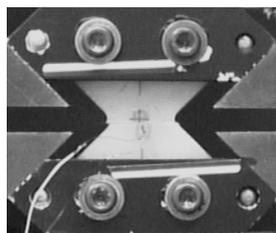


Fig. 8. Eprouvette Mat31 testée en traction ($\alpha = 90^\circ$).

4. Discussion

Des courbes contrainte-déformation mesurées en cisaillement pur, pour les deux spécimens, sont tracées dans Fig. 9. La contrainte de cisaillement est calculée à l'aide la relation (eq. 1). Les modules de cisaillement et les déformations à rupture moyens sont présentés dans Tab. 4. Le module des éprouvettes Mat31 ($G_{13}=3.9$ GPa) est quasiment égal à celui des Mat32 ($G_{23}=3.8$ GPa). Les écart-types sont considérés satisfaisants. On note que les mesures expérimentales sont de 13% inférieures au module de cisaillement longitudinal ($G_{12}=4.4$ GPa) reporté dans Tab. 1, alors que, G_{12} et G_{13} devraient être égaux, d'après l'hypothèse d'équivalence des directions transverse (axe 2) et hors-plan (axe 3) de la CLT (Fig. 1). Le même phénomène est rapporté par Arcan et al. concernant des éprouvettes en verre/époxy, pour lesquelles, les modules obtenus sont très similaires aux présentes valeurs [4, 5]. Hung et Liechti ont testé des éprouvettes

'papillon' en carbone avec une matrice thermoplastique (AS4/PEEK). Ils trouvèrent G_{31} proche de G_{12} , tandis que, G_{32} leur fut pratiquement de moitié inférieure [9].

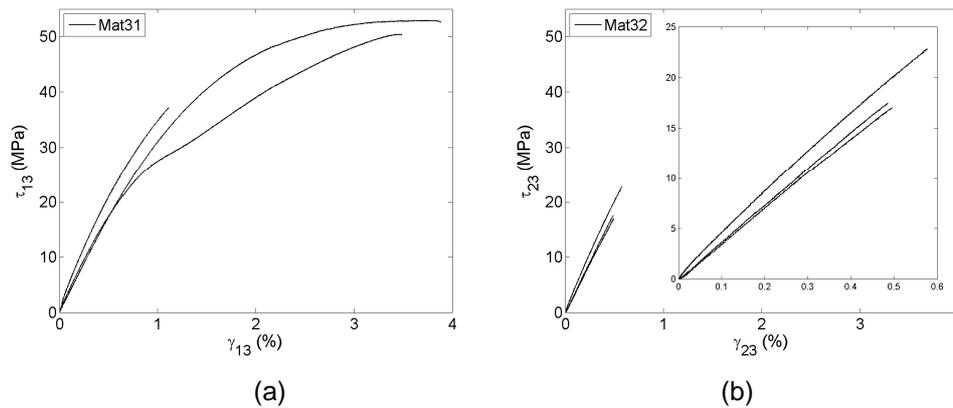


Fig. 9. Courbes contrainte-déformation en cisaillement pur, pour Mat31 (a) et Mat32 (b).

La contrainte à rupture moyenne en cisaillement des spécimens Mat31 (44.5 MPa) est significativement supérieure aux Mat32 (18.9 MPa), comme on peut le noter dans Tab. 3. Cependant, celles-ci sont inférieures à la contrainte à rupture dans le plan ($S_{12}=55$ MPa), donné dans Tab. 2. De la même manière, on note que les déformations maximales atteintes sont plus grandes pour Mat31 (2.81%) que Mat32 (0,52%), bien que les écart-types soient non négligeables dans ce cas.

A mesure que l'angle de sollicitation augmente, l'uniformité du champ de déformation est perturbée à cause de la géométrie des éprouvettes. Pour $\alpha = 90^\circ$, la distribution des déformations hors-plan est non uniforme dans la section significative en raison des encoches, ce qui n'est pas le cas en cisaillement [13]. Aussi, les essais de traction sont juste un moyen de comparaison intrinsèque des modules et contraintes à rupture entre les types de spécimens. On trouve, que les spécimens Mat 32 ont un module normal de 18.1 GPa, tandis que celui des Mat31 est de 15.5 GPa, soit 14% de moins. Par contraste, on peut remarquer que la contrainte à rupture des éprouvettes Mat32 de 27.5 MPa, est inférieure à celle des Mat31 qui est de 36.9 MPa (Tab. 3).

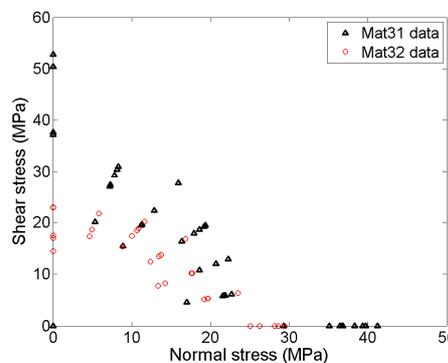


Fig. 10. Enveloppes de rupture biaxiale.

	Module de cisaillement (GPa)	Déformation à rupture (%)
Mat31	3.9 (0,4)	2.81 (1.49)
Mat32	3.8 (0.3)	0.52 (0.05)

Tab. 4. Modules de cisaillement et déformations à rupture moyens.

L'évolution des contraintes de cisaillement (σ_t) en fonction des contraintes normales (σ_n) est tracée dans Fig. 10. On peut voir sur les enveloppes de rupture, que les spécimens Mat31, présentent des niveaux généralement plus élevés, mais aussi avec plus de dispersion. Il existe un écart moyen de l'ordre de 58% en cisaillement pur et de 34% en traction, en faveur de Mat31.

$$\left(\frac{\sigma_n}{Y^t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{S}\right)^2 = 1 \quad (\text{eq. 3})$$

$$\sigma = 1/\sqrt{\left(\frac{\sin \alpha}{Y^t}\right)^2 + \left(\frac{\cos \alpha}{S}\right)^2} \quad (\text{eq. 4})$$

Les modes de rupture observés, consistent essentiellement en une rupture de la matrice. Aussi, nous avons comparé les mesures expérimentales aux valeurs données par le critère de rupture de Hashin simplifié, qui prend en compte une interaction entre les contraintes normales et celles de cisaillement (eq. 3). Les résistances à rupture hors-plan $Y^t=30$ MPa et de cisaillement $S=44.5$ MPa et 18.9 MPa, pour respectivement les éprouvettes Mat31 and Mat32, sont issues de Tab. 2-3. En remplaçant σ_n et σ_t par la contrainte à rupture nominale moyenne σ , on obtient une relation polaire entre l'angle d'essai et cette dernière (eq. 4).

Les enveloppes de rupture calculées en utilisant les contraintes à rupture en cisaillement de Mat31 et Mat32 sont superposées avec les données expérimentales et leurs tendances dans Fig. 11(a). Pour $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$, on constate une bonne corrélation entre les mesures et l'enveloppe calculée de Mat32, ce qui correspond à un ratio maximum σ_n/σ_t de 0.58 alors que les auteurs trouvent $-25^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$, soit $-0.47 \leq \sigma_n/\sigma_t \leq 0.47$ [6]. D'une autre part, les valeurs issues du critère présentent une tendance similaire aux mesures expérimentales de Mat31, mais surestiment amplement les contraintes à rupture, sauf dans le cas de la traction. Le type d'éprouvettes Mat31 est similaire à la stratification étudiée par Voloshin et Arcan et comme indiqué par les auteurs, la corrélation entre les données expérimentales de spécimens à renforts fibres de verre unidirectionnels orientés suivant les encoches et le critère de Hashin est plus ou moins satisfaisante [6] (Fig. 11(b)).

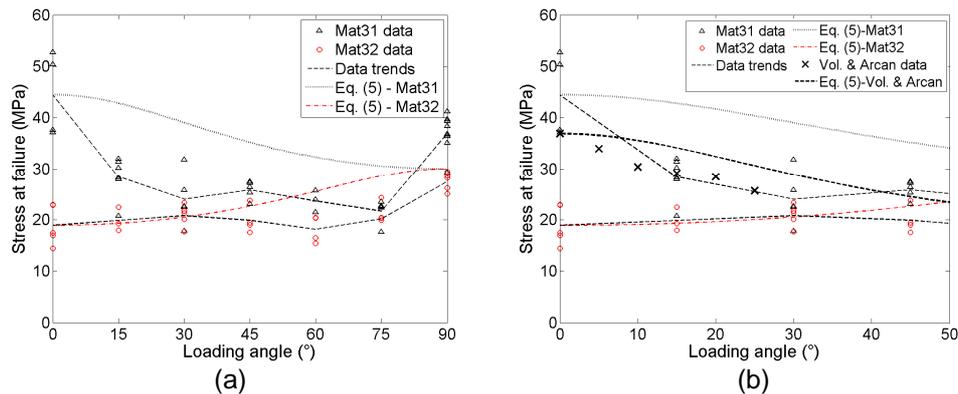


Fig. 11. Evolution des contraintes maximales mesurées et calculées en fonction de l'angle α . Vue globale (a) et détail incluant les résultats de Voloshin et Arcan [6].

5. Conclusion

Ce papier présente les résultats expérimentaux concernant deux types d'éprouvettes en fibres de verre unidirectionnels et matrice époxy testés avec un dispositif Arcan. Les éprouvettes sont constituées de plis préimprégnés empilés parallèlement à la direction des encoches (Mat31) et perpendiculairement à cette ligne pour le second type (Mat32). Plusieurs essais de cisaillement pur, chargements combinés et traction ont été réalisés. On remarque que la rupture des éprouvettes se produit généralement dans la zone de la section significative. La fissuration des éprouvettes Mat31 se produit toujours parallèlement à la direction des encoches, quelque soit l'angle de chargement. En cisaillement pur, les spécimens Mat32 se fragmentent en trois parties, en raison de la propagation de deux fissures opposées, inclinées par rapport à la ligne des encoches, tandis qu'ils se divisent en deux fragments lors de toute autre sollicitation biaxiale. Pour ce dernier cas, la fissuration a tendance à être parallèle à la direction des encoches, à mesure que l'angle de chargement augmente.

Dans l'ensemble, les éprouvettes Mat31 présentent une résistance à rupture plus importante dans tous les cas de chargement, bien que les modules de cisaillement mesurés pour les deux types soient similaires. Les contraintes à rupture expérimentales sont en cohérence avec le critère de Hashin dans la plage d'angles d'essai comprise entre 0° (cisaillement pur) et 30° , pour les éprouvettes Mat32. La corrélation entre les prédictions du critère et les données de spécimens Mat31 n'est pas satisfaisante, car l'enveloppe de rupture calculée surestime largement les mesures expérimentales. On peut remarquer, cependant, une certaine similarité dans les tendances.

Références

- [1] JM. Whitney, DL. Stansbarger, HB. Howell, « Analysis of the rail shear test - Applications and limitations ». *J. of Comp. Mat.*, 5, pp. 24-34, 1971.
- [2] MJ. Hinton, PD. Soden, AS. Kaddour, « Strength of composite laminates under biaxial loads. *Appl. Comp. Mat.*, 22(3), pp. 151-162, 1996.
- [3] MJ. Hinton, AS. Kaddour, PD. Soden, « Failure criteria in fibre reinforced polymer composites: the world-wide failure exercise ». *Elsevier*, 2004.
- [4] M. Arcan, Z. Hashin, A. Voloshin, « A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber reinforced materials ». *Exp. Mech.*, 18(2), pp. 141-146, 1978.
- [5] A. Voloshin, M. Arcan, « Pure shear moduli determination in fibre reinforced materials ». *Fib. Sci. and Tech.*, 13, pp. 125-134, 1980.
- [6] A. Voloshin, M. Arcan, « Failure of unidirectional fiber reinforced materials – new methodology and results ». *Exp. Mech.*, 20(3), pp. 280-284, 1984.
- [7] DE. Walrath, DF. Adams, « The Iosipescu shear test as applied to composite materials ». *Exp. Mech.*, 23, pp. 105-110, 1983.
- [8] L. Arcan, M. Arcan, M. Daniel, « SEM Fractography of pure and mixed-mode interlaminar fractures in graphite/epoxy composites ». *Fractography of Modern Eng. Mat.: Comp. and Metals*, ASTM STP 948, pp. 41-67, 1987.
- [9] SC. Hung, KM. Liechti, « An evaluation of the Arcan specimen for determining the shear moduli of fiber reinforced composites ». *Exp. Mech.*, 37(4), pp. 460-468, 1997.
- [10] SC. Hung, KM. Liechti, « Finite element analysis of the Arcan specimen for fiber reinforced composites under pure shear and biaxial loading ». *J. of Comp. Mat.*, 33(14), pp. 1288-1317, 1999.
- [11] P. Rozycski, « Contribution au développement de lois de comportement pour matériaux composites soumis à l'impact ». *Ph.D. thesis*, University of Valenciennes, 2000.
- [12] JC. Devillers, D. Coutellier, D. Delsart, « Determination of the interface characteristics of a glass-epoxy composite by means of the Arcan test procedure ». *Proceedings International Crashworthiness and design Symposium*, pp. 1177-1185, December 2003.
- [13] D. Delsart, JM. Mortier, M. Dagois, « Experimental characterization and modelling of the inter-ply interface properties of fibre reinforced composite materials ». *Proceedings International Conference on Impact loading of Lightweight Structures*, pp. 205-218, May 2005.
- [14] O. Hoffman, « The brittle strength of orthotropic materials ». *J. of Comp. Mat.*, 1, 200, 1967.
- [15] Z. Hashin, A. Rotem, « A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials ». *J. of Comp. Mat.*, 7, 448, 1973.