HAL open science

Caractérisation du comportement hors-plan d'un tissé interlock = Off-plan behaviour investigation of an interlock fabric

Julien Schneider, Zoheir Aboura, Kamel Khellil, Malik Benzeggagh, David Marsal

To cite this version:

Julien Schneider, Zoheir Aboura, Kamel Khellil, Malik Benzeggagh, David Marsal. Caractérisation du comportement hors-plan d'un tissé interlock = Off-plan behaviour investigation of an interlock fabric. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00398936

HAL Id: hal-00398936

https://hal.science/hal-00398936

Submitted on 25 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.

CARACTERISATION DU COMPORTEMENT HORS PLAN D'UN TISSE INTERLOCK

Off-plan behaviour investigation of an interlock fabric

J. Schneider[1&2], Z. Aboura[1], K. Khellil[1], M. Benzeggagh[1] et D. Marsal[2]

1 Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire de Mécanique Roberval.– F - 60205 COMPIEGNE CEDEX
e-mail : julien.schneider@utc.fr, zoheir.aboura@utc.fr, kamel.khellil@utc.fr, malk.benzegaggh@utc.fr

2 : SNECMA Villaroche – 77550 Moissy-Cramayel
e-mail : david.marsal@snecma.fr, julien.schneider@snecma.fr

Résumé

Cet article propose la caractérisation hors plan d'un composite tissé interlock Carbone/Epoxy. Ce type de matériau offre de nouvelles perspectives pour la réalisation de pièces structurales épaisses tolérantes à l'endommagement. En effet, la présence de renforts dans l'épaisseur liant les différentes couches offre un comportement hors plan intéressant. Il devient donc indispensable de caractériser le comportement hors plan de cette nouvelle génération de matériaux. Ainsi, des essais de traction hors-plan utilisant deux géométries d'éprouvettes ainsi que de cisaillement (torsion et flexion poutres courtes) seront présentés et discutés. Dans le cas des essais de flexions poutres courtes, la mesure des modules de cisaillement est réalisée à l'aide de la technique de corrélation d'images digitales (DIC). La détection et le suivi des endommagements est faite par la technique d'émission acoustique.

Abstract

In this paper, we focus on the off-plane characterization of a Carbon/Epoxy interlock fabric. These kinds of materials offer new prospects for the manufacturing of thick structures accepting damage. The off-plane behaviour was highlighted due to reinforcement in the thickness and binding between the plies. Thus, characterization of the off-plane behaviour was essential. Therefore, two kinds of off-plane tensile with different specimens' geometries and shear tests (torsion, flexion) are presented and discussed. In the flexion case, shear moduli were carried out by Digital Image Correlation (DIC). Acoustic Emission technique allowing the detection and the monitoring of damage has been used too.

Mots Clés : Comportement hors-plan, traction, torsion, flexion, DIC, Emission Acoustique.
Keywords : Off-plan behaviour, tensile, torsion, flexion, DIC, Acoustic Emission.

1. Introduction

Les dernières avancées de l'industrie du tissage associées aux moyens de mise en œuvre de plus en plus maitrisés ont permis la réalisation de structures composites 3D complexes. Ces matériaux essentiellement utilisés en aéronautique offrent de meilleurs comportements face à des états de contraintes multiaxiaux. La présence de renforts dans l'épaisseur permet une meilleure cohésion des couches assurant une plus grande fiabilité des structures épaisses, limitant ainsi les effets des contraintes inter-laminaires.

Cet article s'intéresse plus particulièrement aux composites à architectures interlocks. Ces matériaux sont caractérisés, de par la nature du tissage et de la taille des mèches, par de fortes hétérogénéités locales [1] [2]. De précédents travaux, sur le comportement élastique dans le plan, ont mis en évidence de forts gradients de déformation entre les mèches chaines, trames et la résine [3]. La question concernant la taille du Volume Elémentaire Représentatif (VER), dont les dimensions planes du VER supérieures au centimètre, a donc été traité. Il s'agit de prendre en compte le comportement global du tissage et d'avoir des mesures de déformations dans le plan fiables. Ainsi une méthodologie expérimentale a été mise au point afin de caractériser le comportement élastique, visqueux et endommageable de ces matériaux. Cette approche fait appel à plusieurs techniques [4]. Parmi ces techniques nous pouvons citer la Mesure de Champs (MdC), l'Emission Acoustique (EA), les observations in-situ et post-mortem et dernièrement la visualisation en 3D des endommagements par tomographies X. Ces travaux ont permis, d'une part d'élaborer des scénarii de ruine et d'autre part d'aider à l'identification des paramètres d'un modèle macroscopique développé par l'ONERA (ODM) [5].

Ce type d'approche est étendu à l'étude du comportement hors plan de ces matériaux. Les premiers travaux que nous mettons en œuvre concernent la validité des tests et par conséquent le type d'éprouvettes. En effet, les essais hors plan sont complexes à mettre en œuvre tant au niveau éprouvette et montage qu'au niveau traitement des résultats [6] [7]. Dans un premier temps, l'étude s'oriente vers la détermination des propriétés dans la troisième direction de l'espace en traction. Pour cela l'éprouvette diabolo déjà utilisée dans la littérature [8-9] est comparée à une éprouvette originale en queue d'aronde développée pour la circonstance. Dans un second temps, la détermination des propriétés en cisaillement sera abordée. Deux types d'essais seront menés et comparés. L'essai de torsion sur plaque et barreau et l'essai de flexion poutres courtes. Concernant ce dernier test, une méthodologie originale sera proposée utilisant la mesure des champs de déformations pour la détermination des modules de cisaillement hors et dans le plan.

2. Présentation des matériaux :

Les matériaux de l'étude sont des composites carbone / époxy. L'architecture du renfort est tissé interlock couche/couche (les fils de chaîne peuvent traverser plus de deux couches de trame). Les matériaux sont mis en œuvre par injection selon le procédé RTM (Resin Transfert Molding). Trois familles des matériaux font l'objet de cet article. Ils présentent le même motif de tissage mais diffèrent par la proportion de torons chaîne/trame.

3. Traction hors-plan

Une des difficultés concernant les tests de traction hors plan réside dans l'introduction des efforts. En effet les épaisseurs des composites sont assez limitées. Il faut donc prévoir des essais adaptés à cette caractéristique et faire un compromis entre la longueur de la zone utile de l'éprouvette et introduction correcte des efforts. Une seconde contrainte se rajoute. Il s'agit de la taille et de la forme du VER associée à l'hétérogénéité matériau. Pour l'ensemble de ces raisons, le choix s'est orienté vers deux types d'essai :

Le premier concerne le test sur éprouvette "diabolo" (Fig. 1a) basé sur le principe d'une éprouvette de révolution collée à ses extrémités.

Le second test utilise une éprouvette originale en forme de "Queue d'aronde" (Fig. 1b) dont la géométrie est parallélépipédique. Le serrage s'effectue selon le principe de cônes inversés.

Figure 1. Eprouvette de type "diabolo" (a) et "Queue d'aronde" (b)

3.1. Traction sur éprouvettes Diabolo

L'essai sur éprouvette diabolo nécessite une précaution toute particulière dans l'alignement de l'éprouvette et des mors. Une empreinte avec un ajustement contrôlé permet d'optimiser ces conditions et d'éviter une traction déviée. L'introduction se fait par l'intermédiaire d'un joint de colle entre l'éprouvette et le montage. Il est donc nécessaire de dimensionner la section et la longueur utile de sorte que la contrainte dans le joint de colle soit largement inférieure à la contrainte que subit le matériau.

Des calculs Eléments Finis (EF), élastique linéaire, sur la géométrie de l'éprouvette ont permis un choix optimal des dimensions. La figure 2 présente le calcul EF sur 1/8ème de l'éprouvette. Les calculs aboutissent à une géométrie avec un congé de raccordement à double rayon et une hauteur de zone utile représentative du VER. L'état de contrainte dans la zone utile est bien homogène ce qui présagerait, en théorie, une rupture localisée en zone utile. Les valeurs de contraintes atteintes en zone utile sont bien supérieures à celle de la contrainte Z^+ d'un composite unidirectionnel [8-9] tandis que celles dans le joint sont en dessous de la contrainte ultime de la colle.

Toutefois, les calculs supposent le matériau comme homogène orthotrope et la section utile, circulaire, ne piège qu'une partie d'un VER parallélépipédique.

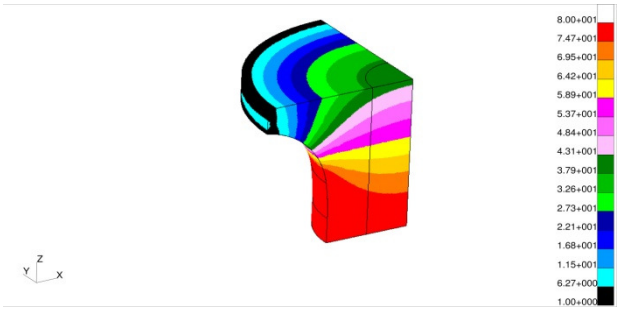
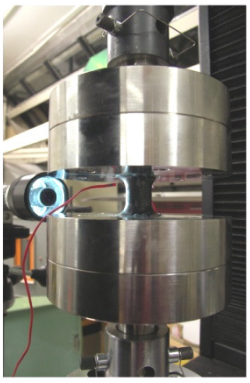
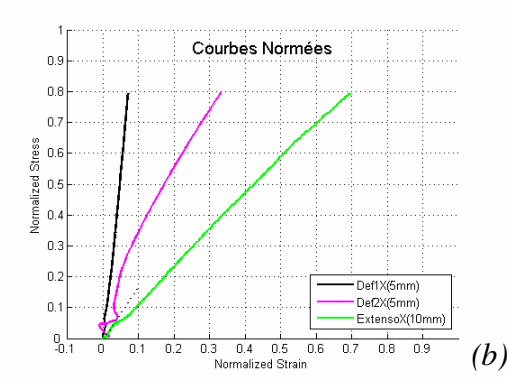


Figure 2 : Etat de contrainte suivant Z pour ⅛ d'éprouvette diabolo

La figure 3a présente une vue d'ensemble de l'éprouvette et du montage d'essai. L'éprouvette est instrumentée de 2 jauges de 5mm de long et d'un extensomètre de 10mm. Ces trois instrumentations sont disposées à 120° sur la circonférence de la partie utile. L'essai est filmé à l'aide d'un vidéo-microscope. L'essai est mené en déplacement imposé à une vitesse de 0.5 mm/min.



(a)



(b)

Figure 3 : Vue d'ensemble du montage (a), courbe Contrainte/Déformation normée (b)

La figure 3b montre l'évolution de la contrainte normalisée en fonction des déformations normalisées des trois instrumentations. Une forte divergence de réponses apparait. Comme pour les essais dans le plan, la forte hétérogénéité du VER peut générer des réponses locales des jauges de déformation [1, 3]. Ainsi, les réponses des jauges de déformations engendrent des modules de rigidités totalement différents et non réaliste. Il est à noter que l'usinage circulaire d'un tissage orthogonal à été réalisé. Ceci génère une surface convexe très hétérogène avec des découpes de torons complexes. On imagine donc aisément, que la mesure effectuée par des jauges de section 5x2mm² couvrant tout au plus 3 torons n'est pas représentative de l'ensemble du matériau.

Contrairement aux jauges, l'extensomètre n'est pas influencé par des déformations locales s'exerçant entre ses couteaux. Si la longueur L_o est suffisante, les mesures de déformation peuvent être assimilées à celle du VER. Ainsi, avec une longueur initiale de 10mm, le module E_3 déterminé possède un ordre de grandeur conforme similaire à celui obtenu sur des éprouvettes type queue d'aronde et des calculs EF méso-macro.

Concernant la ruine de l'éprouvette, la rupture s'est effectuée dans la zone utile avec néanmoins des endommagements périphériques qui sont probablement dus à l'usinage des torons et par conséquent à un affaiblissement local (Fig. 4).

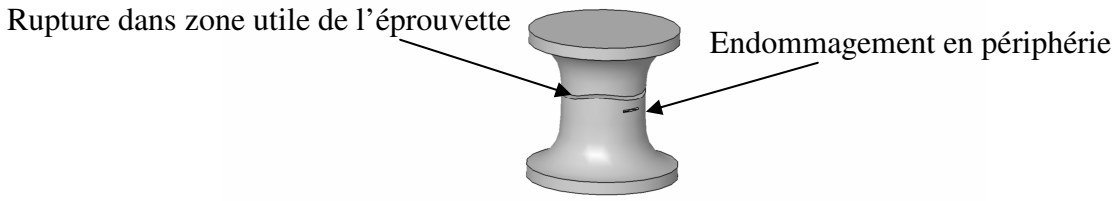


Figure 4 : Schématisation du faciès de rupture ainsi que le premier endommagement de l'éprouvette

3.2. Traction sur éprouvettes Queue d'Aronde (QA)

Une éprouvette originale associée à son montage a été conçue afin de pouvoir tester la totalité d'un VER parallélépipédique. Contrairement aux essais sur diabolos, la forme et les encombrements de l'éprouvette permettent d'effectuer une mesure des champs de déplacement et de positionner un capteur d'émission acoustique. De plus, chaque éprouvette est instrumentée de deux jauges de déformations de 5 mm de long. L'introduction de l'effort de traction se fait par l'intermédiaire de la queue d'aronde. Ce principe permet de générer un serrage proportionnel à l'effort exercé. Cependant, des sollicitations de compression/cisaillement peuvent perturber l'essai. Il est donc nécessaire d'éloigner ces zones de serrage de la zone utile de l'éprouvette et d'optimiser le raccordement entre la zone utile et la zone d'introduction des efforts. En effet, contrairement au cas du diabolo, les concentrations de contrainte vont être essentiellement dues à la géométrie de l'éprouvette et non à la déstructuration du tissage causé par l'usinage.

Le dimensionnement de la géométrie de l'éprouvette se fait par un calcul EF. La modélisation a inclus le montage d'essai en prenant en compte le contact éprouvette / montage (Fig.5).

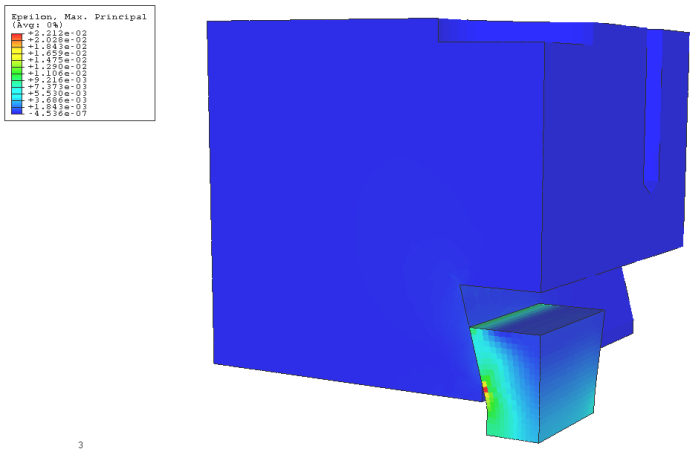


Figure 5 : Etat de déformation suivant Z pour ⅛ d'éprouvette QA + Mors

Le montage prévoit deux configurations : la première sollicite l'éprouvette uniquement par les queues d'arondes des flancs (Fig.6a) alors que la seconde introduit un effort de serrage supplémentaire par le bais de la queue d'aronde de la face. Dans le cas du second montage, un comportement hyperstatique est généré par le second serrage (Fig.6b).

Figure 6 : Montage classique avec queue d'aronde 1D (a) et montage hyperstatique réglable avec queue d'aronde 2D (b)

L'hyperstatisme du second montage, malgré la possibilité de différents réglages, génère une sollicitation non-conforme aux attentes. La vérification de l'introduction des efforts par mesure des déplacements montre un champ convenable dans le cas du premier montage (Fig. 7a) alors que dans le cas du second montage, un champ de cisaillement parasite perturbe l'essai (Fig. 7b). Le second montage a été délaissé au profit de la première configuration d'essai. La figure 8a montre une vue d'ensemble du montage d'essai.

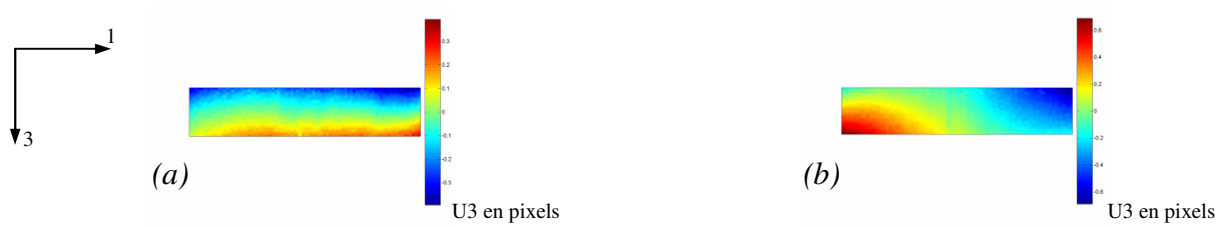
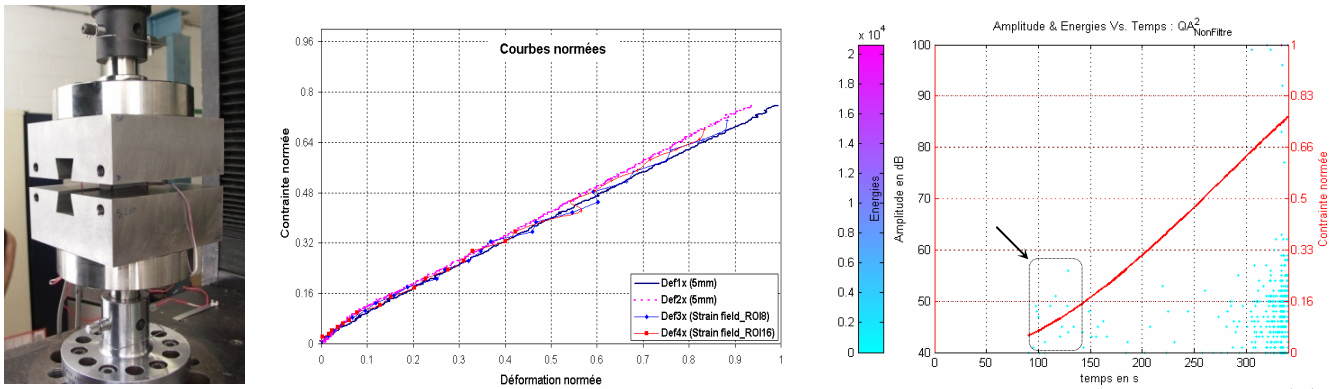


Figure 7 : Champ de déplacement hors plan pour le montage classique (a) et le montage hyperstatique (b).

La figure 8b présente la courbe Contrainte/Déformation normée. Les déformations sont issues de jauges de 5mm et de la mesure du champ de déformation ε_{33} avec deux tailles de région d'intérêt (ROI/ZOI) sur la quasi-totalité d'un flanc de l'éprouvette.
La réponse des jauges de déformations se corrèle assez convenablement avec la mesure de champ, notamment en début de chargement. Un comportement bi-linéaire est révélé. La fin de la première linéarité coïncide avec le début de l'activité acoustique (Fig. 8c). Cette activité de faible énergie présente une amplitude comprise entre 40 et 60dB. Cette gamme d'amplitude est caractéristique d''un endommagement matriciel [10-11]. Les hautes amplitudes (supérieures à 80dB) ne sont constatées qu'à un niveau important de chargement, caractérisant plutôt la rupture de fibres.



(a) (b) (c)

Figure 8 : Vue d'ensemble du montage (a), courbe Contrainte/Déformation normée pour QA simple (b) et Amplitude / énergie de l'activité acoustique durant l'essai (c)

3.3. Comparaison des résultats issus des essais sur éprouvettes Queue d'Aronde (QA) et diabolo

Comme le montre le tableau ci-dessous, le même ordre de grandeur est établi entre le module hors plan E_3 de l'essai sur QA simple et sur diabolo (contrairement au cas du montage hyperstatique). Des travaux sur la modélisation mésoscopique de ce matériau par EF ont également permis de définir un module équivalent à celui trouvé [12]. Néanmoins, la forte concentration de contrainte existant dans l'éprouvette QA a généré une rupture prématurée dans la zone de changement d'angle, expliquant la différence en termes de Z^+.

Pour des raisons de dimensions limitées, la première génération de diabolo ne pouvait contenir un VER complet dans le plan. De nouveaux essais avec un diamètre plus important permettront de contenir un VER dans les 3 dimensions. Ainsi, la mise en place des capteurs d'émission acoustique et l'analyse par mesure de champ seront possibles. Concernant les géométries en queue d'aronde, une ré-optimisation des angles est prévu afin de produire de nouvelles éprouvettes. En effet, nous connaissons les ordres de grandeurs de la rigidité, de la contrainte et déformation à rupture de ce type de matériau. Il nous est dès lors bien plus évident de revoir les géométries et principes (montage hyperstatique inutile).

	QA/Diabolo	EF/Diabolo	EF/QA
E_3	1.13	1.12	1.03
$\sigma_{rupture}$	0.58	x	x

4. Cisaillement hors-plan

Les essais de cisaillement du type IOSIPESCU (éprouvettes entaillées), ou encore Rail-Shear ne sont pas adaptés aux composites à renfort interlocks. Dans ce genre de tissage réalisé avec des torons de dimension significative, le fait de réaliser des entailles génère des concentrations de contrainte importante. Celles-ci faussent totalement les caractéristiques qui pourraient en être déduites. De plus, l'état de cisaillement concentré dans un plan n'est pas représentatif et ne permet pas d'identifier le comportement du VER en cisaillement notamment hors plan.

Au vu de la dimension du VER, il faut s'orienter vers des essais de type quasi-structure afin d'appliquer un état de contrainte uniforme dans une grande zone de l'éprouvette. Ainsi, deux types d'essais seront présentés ; torsion sur barreaux (Fig. 9a) et flexion sur appuis rapprochés (InterLaminar Shear Strenght – ASTM D2344) (Fig. 9b).

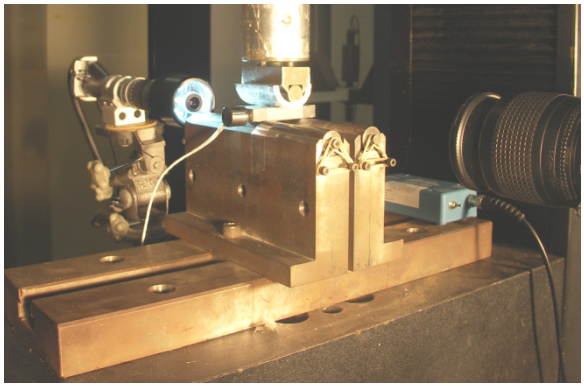
(a)

(b)

Figure 9 : Vue d'ensemble du montage de torsion (a) et du montage de flexion 3pts (b)

4.1. Torsion sur barreaux

L'essai de torsion est par nature un essai non homogène. La distribution des contraintes de cisaillement dans un barreau sollicité en torsion pure est nulle en fibre neutre et évolue d'une manière parabolique. Ainsi, pour un matériau isotrope, une section circulaire permet d'identifier un τ maximum en surface de l'éprouvette. En prenant une éprouvette à paroi mince, il est même possible de considérer τ constant.

Dans le cas d'un matériau orthotrope, un moment de torsion imposé selon l'axe « Ox » de l'éprouvette fait intervenir deux modules de cisaillement générant respectivement τ_{12} et τ_{13}. A cause du gauchissement des sections droites, l'hypothèse logique que tous les éléments de la section équidistants de l'axe subissent des contraintes égales et que le vecteur contrainte est perpendiculaire au rayon correspondant n'est plus acceptable. De plus, l'hypothèse de la conservation de planéité des sections n'est plus valable. L'élasticité anisotrope développée par Lekhnitskii [13], permet d'interpréter ce type d'essai et de déterminer les constantes élastiques par l'intermédiaire des équations suivantes :

$$G_{ij} = \frac{C.L}{\theta.b.h^3.\beta_{(c)}} \quad \text{(i, j = 1, 2, 3)} \qquad \text{(eq. 1)}$$

Tel que

$$\beta_{(c)} = \frac{32.C^2}{\pi^4} \sum_{i=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^4}\left(1 - \frac{2.C}{n.\pi} th \frac{n.\pi}{2.C}\right) \quad \text{avec} \quad C = \frac{b}{h}\sqrt{\frac{G_{ik}}{G_{ij}}} \qquad \text{(eq. 2)}$$

Avec θ : angle de rotation
C : Couple de torsion
b : largeur éprouvette
h : épaisseur éprouvette
L : longueur entre mors

Le paramètre $\beta_{(c)}$, traduisant le gauchissement de la section est dépendant du rapport G_{ik} / G_{ij}. Cette difficulté est souvent surmontée en minimisant l'impact d'une des deux directions. Ainsi, si *C* est supérieure à 5, la fonction $\beta_{(c)}$ est stable et vaut ⅓. Selon les tissages, les rapports de modules de cisaillement peuvent varier entre 0.5 et 1.5. Il suffit donc de choisir une géométrie où b/h≥7 (Plaque).

La figure 10 montre un exemple d'essai de torsion sur plaque avec charges-décharges. Outre la mesure du module de cisaillement dans le plan G_{12} cet essai a permis d'identifier certains paramètres du modèle phénoménologique ODM liés au comportement visqueux du matériau [14].

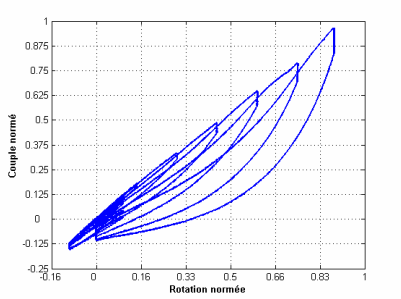


Figure 10 : Courbe Ç= f(θ) pour un essai de torsion suivant le sens chaîne (1).

Dans le cas où b/h<7 (barreau), le dépouillement des essais a été fait en faisant varier le rapport G_{13}/G_{12} (qui constitue une inconnue) dans l'équation 2 et en utilisant deux rapports d'élancement b/h (Fig.11a). La même démarche a été appliquée pour la mesure de G_{13} avec h>b (Fig.11b).

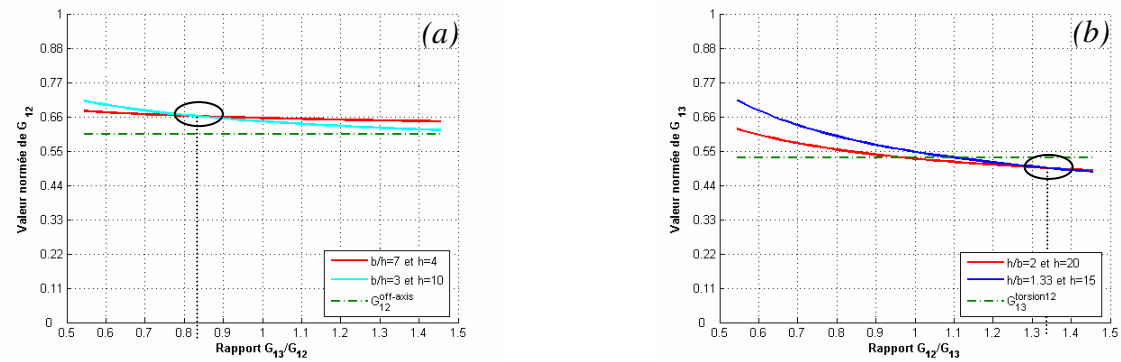


Figure 11 : Valeurs normées de G_{12} (a) et G_{13} (b) en fonction du rapport des modules de cisaillement pour différents rapports b/h

En considérant que le même matériau est testé par l'intermédiaire de différentes géométries, toutes ces courbes devraient se croiser en un rapport des modules propre à l'armure testée. Dans le cas de la figure 11a le rapport G_{13}/G_{12} vaut 0.82 et dans le cas de la figure 11b le rapport G_{12}/G_{13} *est égal à 1.33.* Il est intéressant de remarquer que ces essais vérifient tout de même :

$$\left(\frac{G_{13}}{G_{12}}\right)_{b>h} \times \left(\frac{G_{12}}{G_{13}}\right)_{h>b} = 0.82 \times 1.33 = 1.09 \approx 1$$

Cette démarche permet d'identifier l'inconnue G_{12}/G_{13}. Ainsi en faisant des essais de torsion dans le plan « 12 » avec différents rapport b/h il est possible d'extraire G_{12} et G_{13} simultanément.

Les résultats issus des essais de torsion sont comparés à ceux issu d'essais à ±45°. L'écart constaté entre les deux approches n'excède pas les 10%.

La même démarche doit être effectuée en testant le matériau selon le plan « 23 » afin de déterminer G_{23} et vérifier la pertinence de la démarche en identifiant le rapport (G_{23}/G_{12}).

Cette méthode n'est valable que dans le cas de l'élasticité, toute tentative de mesure de module endommagé est exclue du fait de la perturbation inconnue de la distribution du champ de cisaillement.

4.2. Flexion 3 points rapprochés

Ce type d'essai est utilisé depuis longtemps pour la détermination de la résistance ultime au cisaillement interlaminaire. Avec le développement de nouvelles techniques de mesures telle que la mesure des champs de déformation par images digitales, il devient envisageable de mesurer les déformations de cisaillement et d'en déduire entre autre les modules de cisaillements. Ainsi, plusieurs éprouvettes ont été découpées suivant différentes directions de manière à tester les plans 12, 13 et 23.

Pour assurer un état de contrainte permettant de caractériser $\tau_{rupture}$, la théorie de l'élasticité préconise une section d'éprouvette b/h égale à l'unité et une distance entre appuis extérieurs inférieure à 5 fois la hauteur. En considérant toujours l'idée de tester un VER complet, il nous est impossible de respecter le rapport b/h=1. Par contre, la distance entre appuis utilisée suit les préconisations et vaut 4h. Les profils des appuis, en particulier le central, ont été optimisés afin d'éviter une rupture par estampage. Les diamètres utilisés étant en accord avec la norme. Toutefois, il n'a pas été possible d'éviter ce phénomène lors des essais menés sur le plan 12.

La mesure des champs de déformation dans l'épaisseur de la poutre a permis de quantifier l'état local de ce champ de cisaillement. La figure 12 présente le profil de γ_{xz} suivant la longueur et la hauteur du VER pour différents niveaux de chargement.

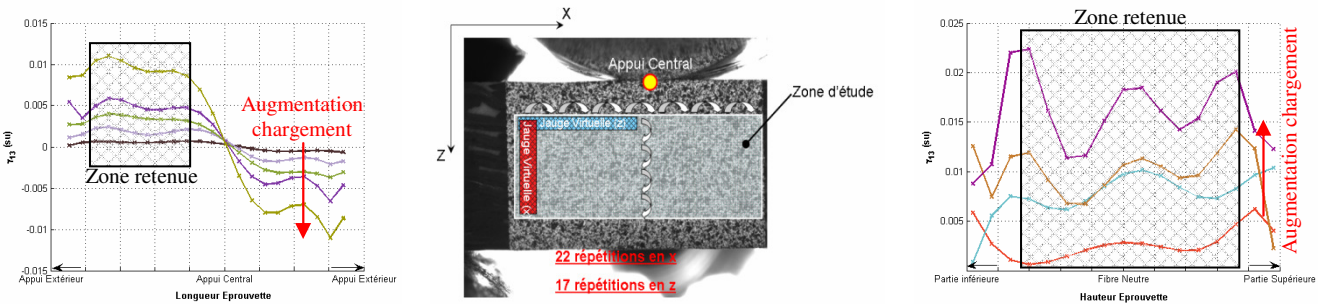


Figure 12 : Profil du cisaillement suivant la longueur (a) et la hauteur (c) de l'éprouvette au cours de différents niveaux de chargements (augmentation flèche) et suivant la configuration (b)

Le champ de cisaillement est conforme à la théorie en phase élastique (début de chargement).Avec l'augmentation du niveau de l'effort, le champ de déformation présente des ondulations liées à la nature du tissage de l'interlock. Une zone est retenue dans laquelle la déformation est moyennée. Elle englobe au moins une zone représentative du VER et présente, au moins dans la partie élastique, un champ de déformation quasi-constant.

La figure 13 présente l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction des déformations ε_{11} , ε_{33} et γ_{13}. Il en ressort que les deux premières déformations sont quasiment nulles tout au long de l'essai ce qui conforte que la sollicitation peut être assimilée à un cisaillement pure. L'évolution de la contrainte τ_{13} en fonction de la déformation γ_{13} présente une zone linaire permettant d'extraire le module de cisaillement G_{13}. Cette phase linéaire est suivie d'une zone non linaire correspondante à un début d'activité d'émission acoustique.

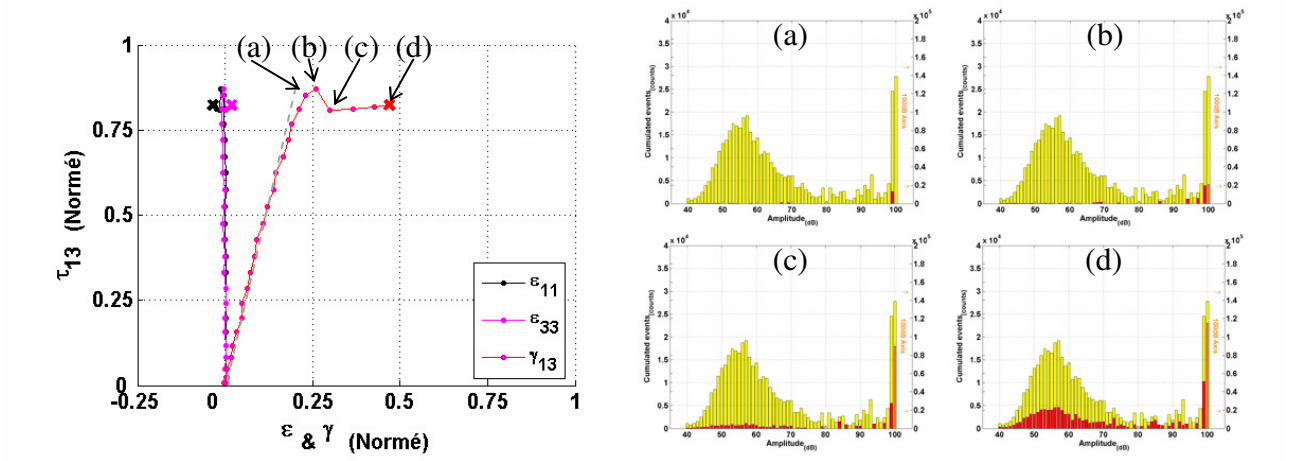


Figure 13 : Courbe Contrainte de cisaillement / Déformation avec activité acoustique à 4 instants représentée en count en fonction de l'amplitude

Les premiers endommagements correspondent à une décohésion localisée d'un premier pli intervenant entre les événements (b) et (c). Les hautes amplitudes caractérisant la rupture de fibre laissent ensuite la place à de plus faible amplitudes, indiquant la progression de rupture d'interface et frottement fibre/fibre et matrice/fibre. Contrairement à un matériau stratifié classique, l'effort est redistribué sur les différentes couches tissées et le matériau continu à encaisser un cisaillement proche de la valeur à rupture.

4.3. Comparaison des résultats issus des essais de torsion et de flexion

Concernant les modules de cisaillement extraits de ces essais, une excellente répétitivité a pu être constaté pour les plans 13 et 23. Plusieurs tissages avec différents ratios Chaine/Trame ont été testées et des tendances ayant du sens ont pu être vérifiées expérimentalement et par le modèle EF mésoscopique.

Pour le matériau présenté dans ce papier, si on considère les essais de flexion 3 points comme référence, une très bonne corrélation existe entre les différents essais pour la détermination des modules de cisaillement. Plusieurs essais de torsions restent à faire afin de confirmer ces résultats. En parallèle, la comparaison essai/simulation diffère dans le cas de G_{12} et G_{23}. Des travaux sont en cours afin de récupérer la géométrie réelle du tissage, qui pour nous explique ces écarts.

	Flex 3pts/Traction	Flex 3pts/Torsion	Flex 3pts/EF
G_{12}	1.05	0.97	1.28
G_{13}	x	0.95	1.01
G_{23}	x	x	0.82

5. Conclusion

A travers cet article, nous avons abordé la méthodologie de détermination de propriétés élastiques hors plan de composites à renfort interlocks. L'originalité du renfort ainsi que sa complexité rend la démarche encore plus délicate. En ce qui concerne le comportement en traction, deux types d'éprouvettes ont été employées. La première, la plus couramment utilisées dans la littérature, en forme de diabolo, présente l'inconvénient de ne pas contenir un VER complet. Par contre elle a l'avantage de concentrer la rupture dans la partie utile. La seconde, en queue d'aronde, constitue un développement original et présente l'avantage de contenir, de par sa forme parallélépipédique au moins un VER. Elle permettrait ainsi l'obtention d'un module de rigidité correct. Elle semble donc être plus adaptée à l'architecture tissée. Néanmoins elle nécessite un développement supplémentaire lié à une optimisation des rayons de raccordements, qui à l'état actuel, localise la rupture faussant la valeur de la contrainte ultime.

La seconde partie de cet article est consacrée à la mesure des modules de cisaillement plan / hors plan. Deux types d'essais ont également été comparés. Il s'agit de l'essai de torsion sur barreau et de l'essai flexion poutre courte. Dans le cadre des essais de torsion, une méthodologie a été proposée permettant la mesure des modules de cisaillement de deux plans à partir d'essai dans un plan en faisant varier le rapport largeur sur épaisseur.

Dans le cas de la flexion poutres courtes, essai largement utilisé pour la détermination des contraintes ultimes en cisaillement, l'introduction de la mesure des champs de déformation par analyse d'images digitales a permis de remonter à la mesure des modules de cisaillement. La démarche semble prometteuse et les résultats obtenus sont en accord avec ceux issus des essais de torsions.

Les auteurs remercient la Société SNECMA pour son soutien technique et financier. Ce travail s'inscrit dans le projet fédérateur MAIA de recherche et technologie en mécanique soutenu par le CNRS, l'ONERA et le groupe SAFRAN.

Références

[1] J. Schneider, L. Marcin, Z. Aboura, D. Marsal, "Experimental investigation and behavior modeling of a 3D interlock woven fabric composite: Part 1" Proceedings TexComp9th, Delaware, 13-15/10 2008.

[2] S. Lomov, D. Ivanov, I. Verpoest, M. Zako, T. Kurashiki, H. Nakai, J. Molinard, A. Vautrin, "full-field strain measurements for validation of meso-FE analysis of textile composites", Composites Part A 2008;39(8):1218-31.

[3] P. Feissel, J. Schneider and Z. Aboura "Estimation of the strain field from full-field displacement noisy data filtering through Diffuse Approximation and application to interlock graphite/epoxy composite", Proceedings ICCM17, Edinburgh, 27-31/08 2009.

[4] J.Schneider, Z. Aboura, K. Khellil, M.L. Benzeggagh et D. Marsal, "Méthode de caractérisation de l'endommagement sur des tisses interlocks par l'alliance de plusieurs", Proceedings JNC16, Toulouse, 10-12/06 2009.

[5] L. Marcin, N. Carrère, J-F. Maire, "A macroscopic viscoelastic damage model for three-dimensional woven fabric composites" Proceedings ECCM13, Stockolm, Sweden, 2-5/06 2008.

[6] IM. Daniel, J-J. Luo, PM. Schubel, "Three-dimensional characterization of textile composites", Composites: Part B : Engineering 2008 : 13-19.

[7] MJ. Lodeiro, WR. Broughton, GD. Sims. "Understanding the limitations of the through-thickness test methods". Proceedings of the 4th European Conference on Composites : Testing and standardization. London: IOM Communications, Ltd; 1998. p.80-90.

[8] M.L. Benzeggagh, K. Khellil et T. Chotard, "Experimental determination of TSAI failure tensorial terms Fij for unidirectional composite materials", Composites Science and Technology 55 (1995) 145-156.

[9] P.A. Lagace et D.B. Weems, "A trough-the-thickness strength specimen for composites", Test methods for design for fibrous composites: 2nd Volume, ASTM STP 1003, 1989, pp.197-207.

[10] D.Scida, Z.Aboura & M.L Benzeggagh "Ageing effect on the damage events in woven composites materials under different loading conditions" Composite Science and Technology 2002 Vol.62 pp 551-557.

[11] S. Barré, M.L Benzeggagh "On the use of acoustic emission to investigate damage mechanics in glass-fibre-reinforced polypropylene", Comp. Sci. Tech., 1994, 52, pp 369-376.

[12] J. Schneider, G. Hello, Z. Aboura, M.L. Benzeggagh and D. Marsal "A Meso-FE Voxel modelof an interlock woven composite", Proceedings ICCM17, Edinburgh, 27-31/08 2009.

[13] S.G. Lekhnitskii, "Theory of elasticity of an anisotropic elastic body", Holden-day, Inc. 728 Montgomery Street, San Franciso, California 1963.

[14] L. Marcin, J. Schneider, M. Kaminski, J.-F. Maire, D. Marsal, "Experimental investigation and behavior modeling of a 3D interlock woven fabric composite: Part 2" Proceedings TexComp9th, Delaware, 13-15/10 2008.