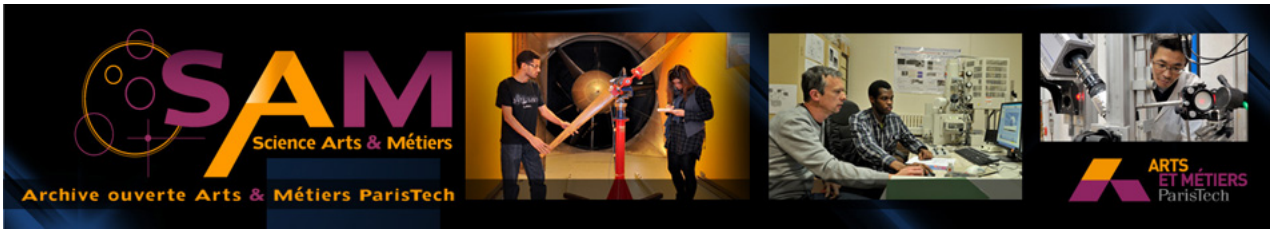
Science Arts & Métiers (SAM)
is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: https://sam.ensam.eu
Handle ID: .http://hdl.handle.net/10985/11996

To cite this version :

Pascal POMAREDE, Stéphane DELALANDE, Nico Felicien DECLERCQ, Fodil MERAGHNI - Détection et suivi de l'endommagement anisotrope par méthode ultrasonore dans un composite à renfort tissé et matrice polyamide PA 66/6 - 2017

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers ParisTech researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: http://sam.ensam.eu
Handle ID: .http://hdl.handle.net/null

To cite this version :

Pascal POMAREDE, Fodil MERAGHNI, Stéphane DELALANDE, Nico DECLERCQ - Détection et suivi de l'endommagement anisotrope par méthode ultrasonore dans un composite à renfort tissé et matrice polyamide PA 66/6 - 2017

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository Administrator : archiveouverte@ensam.eu

Détection et suivi de l'endommagement anisotrope par méthode ultrasonore dans un composite à renfort tissé et matrice polyamide PA 66/6

Detection and evaluation of anisotropic damage with ultrasonic method in a glass woven fabric reinforced polyamide PA 66/6/ composite

Pascal Pomarede[1], Fodil Meraghni[1], Stéphane Delalande[2] et Nico F. Declercq[3]

1: LEM3, UMR CNRS 7239
Art et Métiers Paris Tech
4 Rue Augustin Fresnel, 57078 Metz

2: PSA Group– Centre Technique Vélizy
PSA Peugeot Citroën
Route de Gisy, 78943 Vélizy-Villacoublay

3: Georgia Tech-CNRS UMI 2958
Georgia Tech Lorraine - G.W. Woodruff School of Mechanical Engineering
2 Rue Marconi, 57070 Metz

Résumé

Un composite polyamide 66/6 renforcé par un tissu à armature sergée de 2,2 en fibres de verres a été étudié par une méthode ultrasonore avancée. Les mécanismes d'endommagement de ce type de matériau dépendent de la nature de sollicitation et de l'architecture du renfort, en particulier de l'orientation des fibres. Dans ce travail, une sollicitation en traction a été considérée pour deux configurations d'orientation des éprouvettes : (i) orientée suivant la direction d'écoulement (sens du renfort chaine) et (ii) orientée à 45° de celle-ci. Différents niveaux d'endommagement ont été induis pour ces deux configurations d'échantillons, jusqu'à des niveaux proches de la rupture. Une première estimation de l'endommagement est obtenue à travers la baisse du module d'élasticité et sert de référence. Pour chaque niveau d'endommagement, une méthode ultrasonore de mesure du tenseur de rigidité est ensuite utilisée sur chaque échantillon. Un schéma différent d'évolution anisotrope de l'endommagement a été observé pour chaque configuration d'échantillon.
A partir des signaux obtenus par mesure ultrasonore, un nouvel indicateur d'endommagement a été proposé. Cet indicateur est basé sur la mesure de déphasage du signal ultrasonore par rapport à un signal obtenu sur éprouvette non endommagée. Le nouvel indicateur s'est révélé plus sensible à la dégradation du matériau comparativement à l'indicateur d'endommagement classique fondé sur la réduction du module d'élasticité. Les deux indicateurs ont montré une évolution importante de l'endommagement lors de chargement en traction à 45°de la direction d'écoulement gouverné par un mode de cisaillement.

Abstract

In this study a polyamide 66/6 based composite reinforced with twill woven glass fabric is investigated using an advanced ultrasonic method. It is well established that the damage scheme of those of composites depends on both applied loading and fiber's orientations. Tensile tests on samples oriented (i) along the mold flow direction and (ii) at 45° of this direction were performed. Increasing stress levels were applied on those two samples configurations until composite final failure. A stiffness constants measurement using ultrasound is then carried out for each applied stress level. Different damage schemes were observed for the two samples configuration.
Based on the transmitted ultrasonic signals acquisitions a new damage indicator is proposed. It is based on the phase shift between the signal measured on a damaged sample and the signal from a reference sample. The new ultrasonic damage indicator is proven to be highly sensitive to the material degradation. It has been compared to the classical damage indicator based on the modulus reduction measured during tensile tests. Due to predominance of shear stress, both damage indicators exhibit a higher evolution for the samples oriented at 45° than those oriented at 0°.

Mots Clés : Composite à base polymères, Contrôle Non Destructif (CND), Indicateur d'endommagement
Keywords : Polymer based composite, Non Destructive Evaluation (NDT), Damage indicator

1. Introduction

Les matériaux composites à base polymères sont de plus en plus présents dans l'industrie automobile. Plus spécifiquement, les composites à renfort tissé font l'objet de nombreuses recherches actuellement [1–3]. Cet engouement est dû notamment à leurs intéressantes propriétés comparées aux matériaux composites à renfort discontinus ou non architecturés. En plus de la réduction de la densité par rapport aux matériaux métalliques utilisé classiquement, les composites tissés vont proposer un meilleure équilibre des propriétés mécaniques dans le plan du composite et une meilleure résistance au sollicitions hors plan. Cette dernière caractéristique a favorisé le choix de l'industrie automobile d'introduire ce type de composite dans la problématique de substitution métal/composite.

Néanmoins, ces matériaux composites ont une cinétique d'endommagement et des mécanismes associés relativement complexe. L'identification de cette cinétique nécessite une investigation des modes d'endommagement pour différents cas de sollicitations mécaniques. Elle requiert donc le développement de techniques de contrôle et de détection appropriées et résolument efficaces en termes de sensibilité aux modes de dégradation des composites. Elles doivent pouvoir être utilisées pour contrôler des pièces automobiles pour toutes les différentes étapes allant de l'élaboration jusqu'au contrôle en service de façon non destructif (CND).

Les méthodes basées sur les ultrasons ont rapidement été choisies pour la suite de cette étude grâce à leur flexibilité, la multiplicité des méthodes et leur facilité de mise en œuvre. Parmi les nombreuses méthodes de CND ultrasonores, la méthode d'évaluation des constantes de rigidité par mesures de vitesses de propagation des ondes est particulièrement notable. Etudié par Markham [4] sur un matériau composite isotrope transverse, elle a permis d'obtenir l'ensemble du tenseur d'élasticité du matériau, permettant une analyse complète de l'anisotropie de l'échantillon. La méthode a ensuite été utilisée pour évaluer l'endommagement, par réduction de modules d'élasticité, d'échantillon sollicité en impact [5, 6] et en traction [7]. Cette méthode peut en effet donner accès à de nombreuses informations sur l'anisotropie de l'endommagement et donc alimenter des modèles de comportement de matériaux composites. Cependant, elle ne permet pas de quantifier un indicateur d'endommagement pouvant être facilement et rapidement interprétable sur composant en service. En effet, la méthode de contrôle et quantification de l'endommagement doit à terme pouvoir être facilement utilisable à la fois sur lignes de production et sur véhicules en service.

La présente étude propose un indicateur d'endommagement pouvant répondre à cette problématique. Cet indicateur évalue le déphasage du signal par rapport à un cas de référence sans endommagement. Comme il se base sur des mesures pour différentes valeurs d'angle d'incidence cet indicateur peut fournir des informations sur l'évolution de l'endommagement pour différentes orientations du matériau testé.

Durant cette étude, un composite polyamide 66/6 renforcé par un tissu (sergé 2/2) de fibres de verre sera analysé. Plus spécifiquement, on considère deux configurations d'échantillons. Dans la premiere, les éprouvettes ont été découpées suivant le sens du renfort chaîne (orientation 0°) tandis que pour la deuxième les échantillons sont orientés à 45° par rapport au sens chaine. Ce dernier correspondant à la direction d'écoulement de la résine lors de l'injection de la plaque composite. Ces deux configurations d'éprouvette permettent de considérer deux cas de chargement générant deux cinétiques d'endommagement différentes : le premier gouverné par une contrainte de traction tandis que le deuxième est plutôt gouverné par une prédominance des contraintes de cisaillement plan. Les deux configurations d'échantillons seront sollicitées en traction interrompue à différents niveaux de contraintes induisant ainsi une dégradation progressive et graduelle dans ces échantillons. Une première estimation de l'endommagement est faite par calcul de la réduction de module. Outre l'évaluation des constantes de rigidité par ultrasons, le nouvel indicateur d'endommagement estimé à travers le déphasage de signaux ultrasonores est analysé pour les deux configurations d'échantillons testés. Une comparaison avec les baisses de modules a démontré la pertinence et la sensibilité du nouvel indicateur pour traduire l'endommagement anisotrope dans le composite étudié.

2. Matériaux et essais mécaniques

Le matériau composite qui est étudiés ici est un polyamide 66/6 renforcé par un tissu sergé de fibres de verre développé par *DuPont De Nemours*. Il compte trois couches de renfort pour une épaisseur total de 1.5mm. 10 échantillons rectangulaire de 150mm X 45mm ont été découpés pour deux orientations de fibres différentes. 6 échantillons sont orientés suivant le sens chaîne et 4 sont orientés à 45° du sens chaîne (Fig. 1). Après découpe, tous les échantillons sont placés dans une enceinte hygrométrique afin de garantir un taux d'humidité relative de RH 50% du matériau testé.

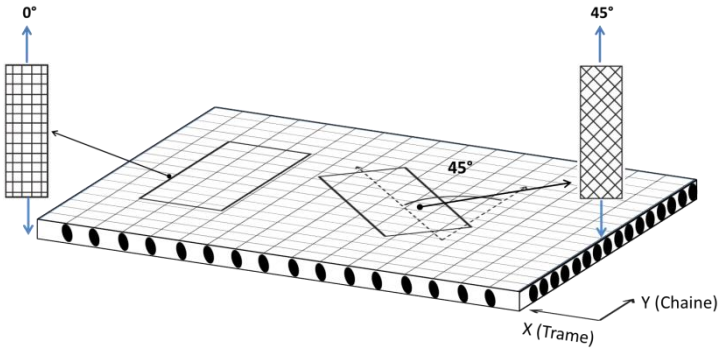


Fig. 1. Positions d'un échantillon orientés à 0° et d'un échantillon orienté à 45° sur la plaque initial

Les échantillons sont ensuite endommagés par des essais de traction à différents niveaux de contraintes. 1 échantillon de la configuration 0° et 1 de la configuration 45° sont laissés intacts pour servir de référence. Les niveaux de chargement choisis sont précisés dans le Tab. 1.

Echantillon	1	2	3	4	5	6
Orientation	0°	0°	0°	0°	0°	0°
Niveau de chargement	0 %$\boldsymbol{\sigma_{UTS0°}}$	30.8 %$\boldsymbol{\sigma_{UTS0°}}$	46.3 %$\boldsymbol{\sigma_{UTS0°}}$	61.7 %$\boldsymbol{\sigma_{UTS0°}}$	77.2 %$\boldsymbol{\sigma_{UTS0°}}$	92.6 %$\boldsymbol{\sigma_{UTS0°}}$
Déformation	0	0.005	0.007	0.010	0.013	0.016
Endommagement	0	0.038	0.061	0.074	0.086	0.089

Echantillon	7	8	9	10
Orientation	45°	45°	45°	45°
Niveau de chargement	0 %$\boldsymbol{\sigma_{UTS45°}}$	30.5 %$\boldsymbol{\sigma_{UTS45°}}$	61.1 %$\boldsymbol{\sigma_{UTS45°}}$	91.6 %$\boldsymbol{\sigma_{UTS45°}}$
Déformation	0	0.021	0.082	0.162
Endommagement	0	0.083	0.208	0.371

Table. 1 : Niveaux de contrainte appliquées et de déformation atteintes pour les deux configurations d'échantillons respectivement orientés à 0° et 45° par rapport au sens chaine. Sont également indiqués l'endommagement induis mesuré par réduction du module élastique après une décharge. RH50 %

Tous les essais de traction présentés ici ont été réalisés sur une machine *Zwick Roell Z050* en suivant la même procédure. Les échantillons sont chargés en traction à une vitesse de déformation de 10^{-4} s^{-1} jusqu'aux valeurs de contrainte ciblés. Ces niveaux de chargement sont visibles sur la courbe contrainte/déformation (Fig. 2) pour les configurations d'échantillons orientés à 0° et à 45° du sens chaine. Les échantillons subissent ensuite une décharge élastique jusqu'à 10N puis une recharge jusqu'à atteindre une déformation de 0.4%. Ceci permet de mesurer l'endommagement induit pendant le chargement à travers la baisse du module d'élasticité. L'endommagement est alors calculé comme la réduction du module élastique : $\boldsymbol{D = 1 - \frac{E_n}{E_0}}$, avec E_0 le module d'élasticité de l'échantillon lors du premier chargement et E_n le module d'élasticité de l'échantillon lors du rechargement.

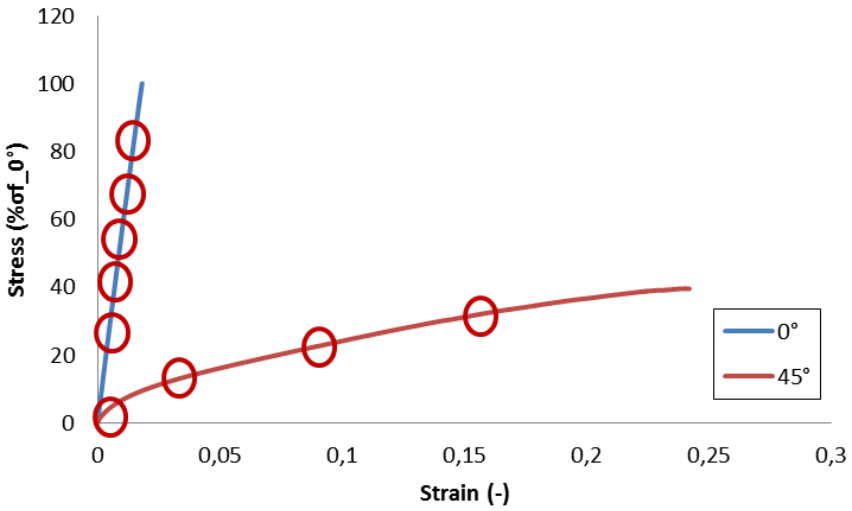


Fig. 2. Courbe typique contrainte/déformation du polyamide 66/6 renforcé par un tissus de fibre de verre pour une orientation suivant et à 45° du sens chaine. Les niveaux de contraintes choisis sont schématisés en rouge

On peut noter tout d'abord que le comportement est bien différent pour les deux configurations d'échantillons. C'est-à-dire ductile et gouverné par la matrice pour la configuration 45° et fragile et gouverné par les fibres pour la configuration 0°. Ceci est confirmé par l'évolution de l'endommagement représentée sur la Fig.3. Le choix de concentrer l'étude sur ces deux cas extrêmes de chargement en traction est ainsi conforté. Cette évolution de l'endommagement servira de point de comparaison pour le reste de l'étude.

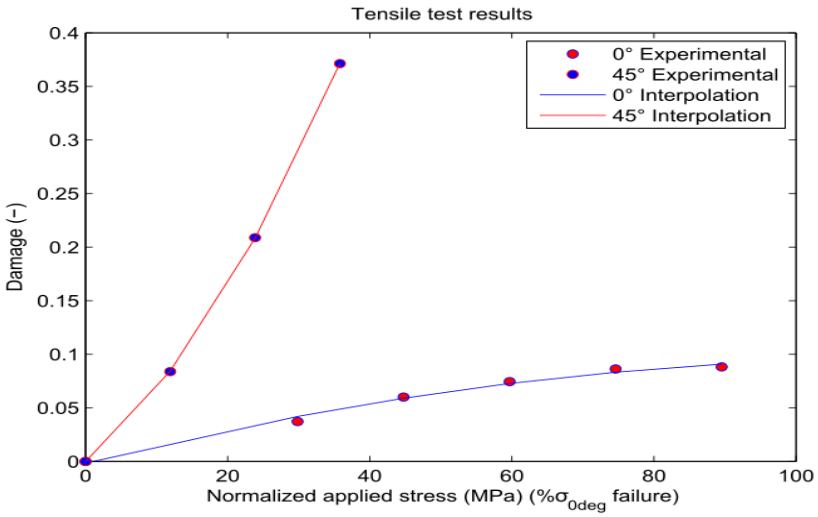


Fig. 3. Evolution de la réduction du module élastique pour différent niveaux de chargement pour les deux cas d'orientation d'échantillons

3. Mesure des coefficients de rigidité par ultrasons

3.1 Principe de la méthode

Cette méthode est basée sur la mesure de la vitesse de propagation des ondes dans le matériau considéré pour différents angles d'incidence. En effet, on peut montrer que cette vitesse de propagation est directement reliée aux propriétés de rigidité du matériau. En considérant alors un

nombre suffisant de direction de propagation, il est alors possible de reconstituer l'ensemble du tenseur de rigidité. Pour cela, nous utilisons l'équation dites de Christoffel :

$$\left(C_{ijkl} n_k n_j - \rho v^2 \delta_{ij}\right) U_l = 0$$

Avec C le tenseur de rigidité, n le vecteur normal au plan de propagation de l'onde, ρ la densité de l'échantillon, v la vitesse de phase et δ le symbole de Kronecker.

La vitesse de propagation des ondes est obtenue expérimentalement par la mesure d'un délai temporel δ_t. Il s'agit de la différence entre le temps de parcours de l'onde de l'émetteur au receveur avec l'échantillon et le temps de parcours sans l'échantillon. Il est alors possible d'obtenir l'angle de réfraction et la vitesse de propagation correspondante à l'aide des deux équations suivantes :

$$\theta_r = \operatorname{atan}\left(\frac{\sin(\theta_i)}{\cos(\theta_i) - \frac{V_0 \delta_t}{e}}\right)$$

$$V_p = \frac{\sin(\theta_r) * V_0}{\sin(\theta_i)}$$

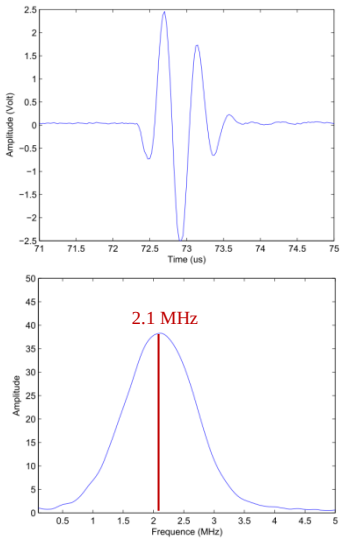


Fig. 4. Pulse emis (Haut) et spectre associés (Bas) d'un transducteur 2.25 Mhz

Ceci permet d'obtenir un set de vitesse de propagation d'onde pour différentes directions de propagations ou différents angles d'incidence. Pour un matériau orthotrope, des mesures dans les trois plans principaux sont nécessaires afin d'avoir un tenseur de rigidité complet traduit par 9 constantes indépendantes. On peut définir alors un problème de minimisation surdéterminé de l'équation de Christoffel. Afin de le résoudre, nous proposons d'utiliser une approche de minimisation des moindres carrés basée sur l'algorithme de Levenberg-Marquardt. La fonctionnelle a minimisée est la suivante :

$$F\left(C_{ij}\right) = \sum_n \left[V_{exp} - V_{num}(C_{ij})\right]^2, with\ n : le\ nombre\ de\ vitesses\ expérimentale$$

Afin d'initialiser l'algorithme, une première estimation de la solution, i.e. le tenseur de rigidité, obtenus par homogénéisation périodique est utilisé [8]. Une estimation de l'intervalle de confiance est également calculée pour chacune des composantes de rigidités obtenues par optimisation. Ces intervalles sont calculés à l'aide de la matrice de covariance noté ϕ :

$$\phi = \frac{r^t * r}{n - m} * \left([J]^t * [J]\right)^{-1}$$

avec $[J] = \frac{\partial F(C_{ij})}{\partial C_{ij}}$ la matrice jacobienne, r : le vecteur des résidus après calcul d'optimisation (Autrement dit, la valeur de la fonctionnelle calculée avec la matrice de rigidité obtenue), m : le nombre de composantes de rigidité a identifiés et n : le nombre de valeurs de vitesses expérimentales utilisé pour l'identification. Les valeurs d'intervalles de confiance sont ensuite extrait de la diagonale de la matrice jacobienne tel que :

$$ci(i) = \sqrt{\phi_{ii}}$$

Pour utiliser l'équation de Christoffel, le matériau étudié doit être considéré comme homogène. Pour satisfaire expérimentalement cette condition, nous devons travailler avec des fréquences pour lesquels la longueur d'onde est supérieure au plus petit élément de la microstructure c'est-à-dire les fibres. C'est pourquoi il a été décidé d'utiliser un transducteur à immersion Panasonic centré à 2.25 MHz. Le signal émis ainsi que le spectre résultant peut être observé sur la Fig. 4. Les essais ont été réalisés à Georgia Tech Lorraine à l'aide d'un scanner à immersion spécialement conçu par *Inspection Technology Europe BV*. Le signal est émis par un système dual pulser-receiver DPR500 conçu par *JSR Ultrasonics*. Les essais sont paramétrés à l'aide du logiciel *Winspect*, qui sert également de plateforme d'acquisition.

3.2 Echantillons orientés à 0° du sens chaîne

Tout d'abord, nous pouvons noter que les valeurs de rigidités obtenues expérimentalement sont proches de celles déterminées par homogénéisation périodique. Pour rappel 6 échantillons, et donc 6 niveaux de chargement en contrainte, ont été considérés pour cette orientation. Ces valeurs de contraintes s'échelonnant de 0 à 92% de la charge à rupture suivant le sens chaîne. L'évolution des valeurs de rigidité résultante est visible sur la Fig. 5 avec une interpolation de 3éme ordre pour une meilleure visibilité.

Il peut tout d'abord être noté que les valeurs de C_{11} et C_{13} vont décroitre de manière importante avec l'augmentation du chargement. Une diminution plus mesuré de C_{12} et C_{55} est également visible. Compte tenus du type de chargement (traction à 0°), les coefficients C_{33}, C_{22} et C_{44} ne présentent quant à eux presque aucune évolution en fonction du chargement. L'impact du chargement se fait principalement sur les composantes de rigidités dépendant de la direction de chargement en traction (ici la direction 1). Il s'agit donc des composantes C_{11}, C_{13} et C_{12}.

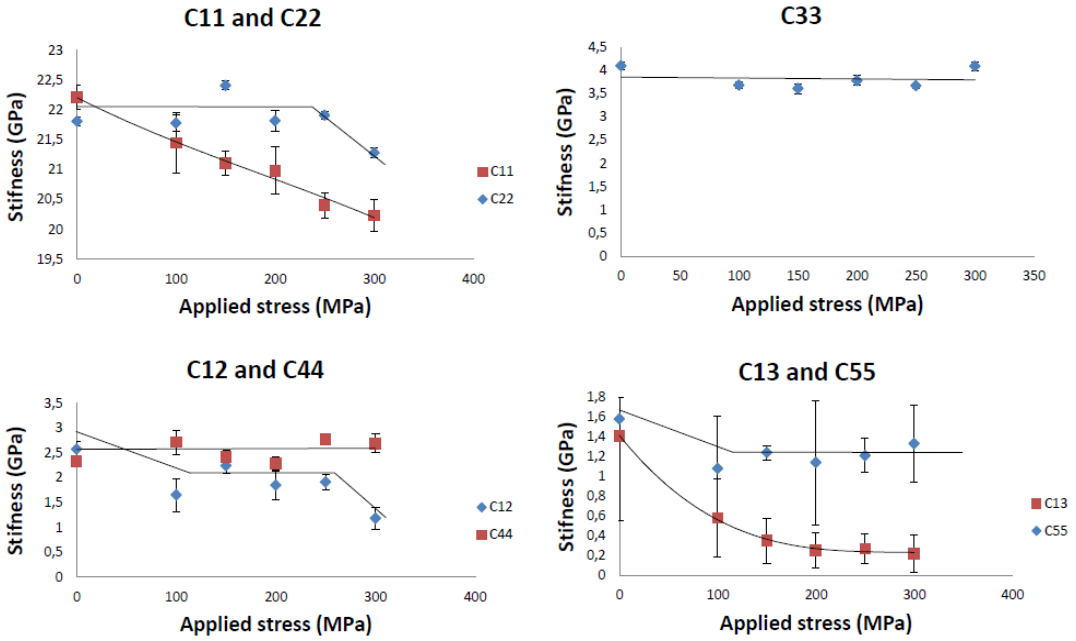


Fig. 5. Evolution des constantes de rigidités obtenues par mesures ultrasonores sur le set d'échantillon orienté suivant le sens chaîne et intervalles de confiance associés

3.3 Echantillons orientés à 45° du sens chaîne

Pour le cas des échantillons orientés à 45° du sens chaîne, les composantes qui dépendent de la direction de chargement ne vont pas évoluer dans un premier temps (Fig. 6). Elles vont en revanche décroitre une fois des hautes valeurs de chargement (61%$\sigma_{UTS45°}$) atteintes, particulièrement les composantes C_{11} et C_{13}. Les composantes de cisaillement C_{44} et C_{12} vont diminuer dès le début du chargement. Néanmoins, les composantes C_{33} et C_{55} ne vont pas évoluer significativement. Ceci mène à un schéma d'endommagement très différent de celui observé pour les échantillons orientés suivant le sens chaîne (0°). Dans ce cas, l'impact du cisaillement est beaucoup plus présent comme il peut être attendu au regard du cas de chargement à 45°. Cet impact est correctement détecté par la méthode ultrasonore.

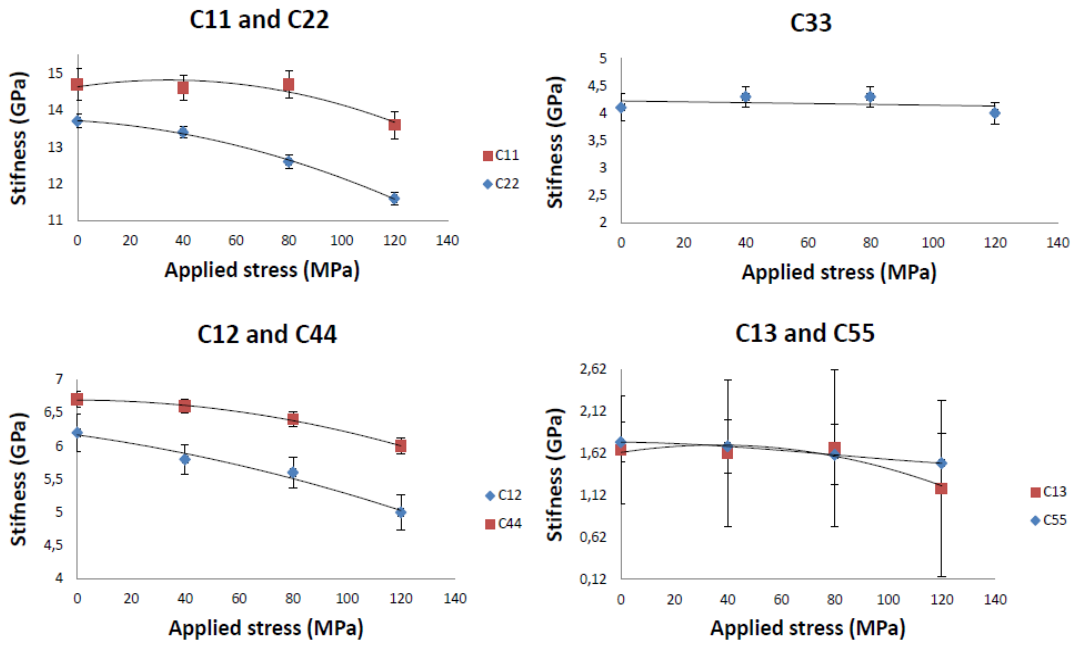


Fig. 6. Evolution des constantes de rigidités obtenues par mesures ultrasonores sur le set d'échantillon orienté à 45° du sens chaîne et intervalles de confiance associés

La pertinence de cette méthode pour évaluer l'endommagement est donc bien validée. Sa capacité à délivrer des informations sur l'anisotropie de l'endommagement en fait une grande aide dans le milieu du Contrôle Non Destructif des matériaux composites.

4. Proposition d'un nouvel indicateur d'endommagement

La méthode de mesure de constantes de rigidité par ultrasons est capable de donner de nombreuses informations sur l'échantillon testé. Néanmoins, deux facteurs peuvent limiter son application sur composant en service (mesure operando). Tout d'abord, cette profusion d'information peut être pénalisante pour pouvoir donner un diagnostic définitif et clair sur l'état d'endommagement d'une pièce. De plus, l'étape de post-traitement fondé sur une méthode inverse peut être relativement longue et nécessiter plusieurs itérations avant convergence. C'est pour cela qu'un nouvel indicateur d'endommagements basé sur cette méthode de mesures des constantes de rigidité est proposé. Cet indicateur est basé sur les signaux ultrasonores directement obtenus par la méthode décrite précédemment. Il a l'avantage de prendre en compte l'aspect analyse pseudo-3D de l'échantillon permettant une sensibilité à l'anisotropie de l'endommagement. Là où une analyse à angle d'incidence fixé peut ne pas être suffisante pour évaluer efficacement l'importance de l'endommagement. Plus spécifiquement, le présent indicateur est basé sur la mesure du déphasage

entre le signal ultrasonore mesuré et le signal équivalent obtenu sur un échantillon de référence sain. Avec l'hypothèse d'homogénéité du matériau, la propagation de l'onde ultrasonore n'est pas perturbée par la microstructure du composite grâce au choix pertinent des fréquences du transducteur (2.25MHz). Ainsi la faible perturbation du signal par l'apparition de l'endommagement est principalement visible sous forme d'atténuation de l'amplitude ou de changement dans la vitesse de propagation. Cet indicateur est calculé comme suit :

$$DI = \frac{1}{n} * \sum_{0}^{n_{max}} abs\left(\overline{ph(n)} - \overline{ph_0(n)}\right),$$

$$\overline{ph(n)} = \frac{1}{sp} * \sum_{t} ph(t,n)$$

$$ph(t,n) = \operatorname{atan}\left(\frac{Im\left(\widetilde{H(t,n)}\right)}{Real\left(\widetilde{H(t,n)}\right)}\right) = Im\left(Log\left(\widetilde{H(t,n)}\right)\right),$$

$$with : n: incidence\ angle\ consider$$
$$sp : sampling\ points\ of\ the\ evaluated\ signal$$
$$\widetilde{H(n)} : Hilbert\ transform\ of the\ response\ signal\ for\ a\ given\ n$$

L'évolution de l'indicateur avec l'augmentation du niveau de contrainte est représentée sur la Fig. 7 pour les deux configurations d'échantillons. Le déphasage est bien sensible au niveau d'endommagement et augmente avec ce dernier. De plus, on peut noter que l'indicateur renvoie une plus grande évolution pour la configuration à 45° du sens chaine que pour celle à 0°. Nous retrouvons la tendance observée avec la mesure de l'évolution du module élastique présentée dans la partie 2).

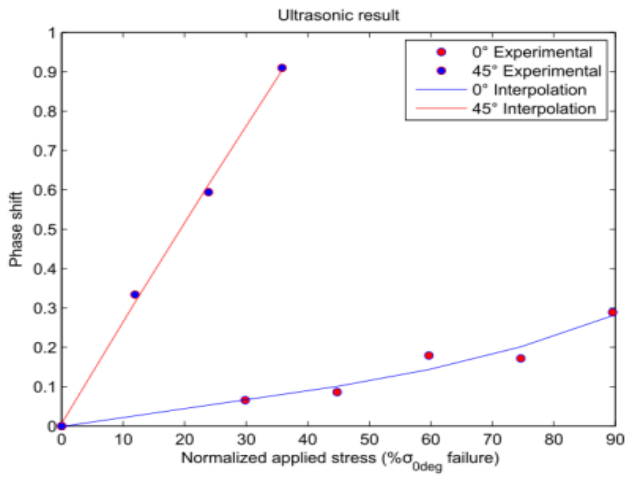


Fig. 7. Evolution des constantes de rigidités obtenues par mesures ultrasonores sur la configuration d'échantillon orienté à 45° du sens chaîne

5. Conclusion

Durant cette étude, l'évolution et la quantification de l'anisotropie de l'endommagement dans un composite à renfort tissé a été examiné par méthode ultrasonores. Plus spécifiquement, des échantillons orientés à 0° et 45° du sens chaine ont été considérés. Une augmentation de l'endommagement en traction beaucoup plus importante pour la configuration d'échantillons

orientés à 45° a été observée. Cette différence a été mise en relation avec la présence plus importante d'effort de cisaillement durant l'essai de traction. Cette influence du cisaillement a pu être observée lors de la mesure par méthode ultrasonore des coefficients de rigidité des échantillons pour différent niveau de chargement. En effet, un schéma d'endommagement différent a été noté pour les deux configurations. Les composantes dépendant de la direction de chargement (noté 1) étant plus sollicités dans le cas 0°. Les composantes de cisaillement ainsi que les composantes dépendant des directions 1 et 2 étant quant à elles plus sollicité dans le cas 45°. Ceci a validé la pertinence de l'utilisation de cette technique de CND pour évaluer l'endommagement dans le matériau composite étudié. Un nouvel indicateur d'endommagement basé sur les signaux obtenus pour la détermination des coefficients de rigidité a ensuite été proposé. Celui-ci est basé sur une évaluation du déphasage du signal transmis par rapport à un signal obtenu sur échantillon de référence non endommagé. Cet indicateur présente une évolution plus importante dans le cas des échantillons orientés à 45° du sens chaîne. Ceci en accord avec la première évolution de l'endommagement, obtenu par réduction du module élastique lors des essais mécaniques.
Afin de pouvoir appliquer cette nouvelle méthode de quantification de l'endommagement en milieu industriel, il est envisagé d'utiliser une méthode ultrasonore à couplage dans l'air plutôt que dans l'eau. Ceci permettrait d'intégrer cette méthode CND à une ligne de production ou pour une pièce en service plus efficacement. Une autre extension serait d'utiliser des transducteurs au contact pouvant contrôler les échantillons à incidence variable. La méthode pourrait ainsi être portable et ne plus nécessiter de système de déplacement des transducteurs.

Remerciements

Ce travail est financé par le groupe PSA et réalisé dans le cadre de l'OpenLab Materials and Processes. Cet OpenLab implique le groupe PSA, les Arts et Metiers ParisTech et Georgia Tech Lorraine.

Références

1. Malpot A, Touchard F, Bergamo S (2015) Effect of relative humidity on mechanical properties of a woven thermoplastic composite for automotive application. Polym Test 48:160–168. doi: 10.1016/j.polymertesting.2015.10.010
2. Volgers AP, Kuhlmann H, Zhang Z (2015) New constitutive model for woven thermoplastic composite materials . In: 2015 SIMULIA community Conf. pp 1–13
3. Golzar M, Poorzeinolabedin M (2010) Prototype fabrication of a composite automobile body based on integrated structure. Int J Adv Manifacturing Technol 49:1037–1045. doi: 10.1007/s00170-009-2452-6
4. Markham MF (1970) Measurement of the elastic constants of fibre composites by ultrasonics. Composites 145–149.
5. Marguères P, Meraghni F (2013) Damage induced anisotropy and stiffness reduction evaluation in composite materials using ultrasonic wave transmission. Compos Part A Appl Sci Manuf 45:134–144.
6. Marguères P, Meraghni F, Benzeggagh ML (2000) Comparison of stiffness measurements and damage investigation techniques for a fatigued and post-impact fatigued GFRP composite obtained by RTM process. Compos Part A Appl Sci Manuf 31:151–163.
7. Hufenbach W, Ritschel T, Böhm R, Langkamp A (2006) Ultrasonic determination of anisotropic damage in fibre and textile reinforced composite materials. Conf. Damage Compos. Mater.
8. Lomov S V, Ivanov DS, Verpoest I, et al. (2008) Predictive analyses and experimental validations of effective elastic properties of 2D and 3D woven composites. 13th Eur. Conf.

Compos. Mater.