

Performance mécanique d'un composite carbone/PPS sous environnement hygrothermique

Mechanical performance of a carbon/PPS composite under hygro-thermal environment

Ivanna Pivdiablyk¹, Patrick Rozycki¹, Laurent Gornet¹, Frédéric Jacquemin², Stéphane Auger³

1 : Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique
Ecole Centrale de Nantes

1 Rue de la Noë - 44321 Nantes Cedex 3

e-mail : ivanna.pivdiablyk@ec-nantes.fr, patrick.rozycki@ec-nantes.fr, laurent.gornet@ec-nantes.fr

2 : Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique
Université de Nantes

58 Rue Michel Ange - 44600 Saint-Nazaire

e-mail : frederic.jacquemin@univ-nantes.fr

3 : Ingénierie des assemblages
Centre Techniques des Industries Mécaniques
74, Route de la Jonelière - 44326 Nantes Cedex 3
e-mail : stephane.auger@cetim.fr

Résumé

Le polysulfure de phénylène renforcé par des fibres de carbone est largement utilisé comme matériau d'ingénierie au sein des industries aéronautique et automobile. Ce composite tissé thermoplastique de haute performance est connu pour sa résistance aux chocs, aux dommages et aux produits chimiques. A la connaissance des auteurs, la capacité d'absorption d'humidité et la cinétique de désorption/absorption n'ont pas encore été étudiées de manière approfondie principalement du fait que le matériau est reconnu pour sa faible absorption d'humidité. Nous proposons d'établir un protocole rigoureux afin de contrôler l'influence possible du peu d'humidité absorbée. De plus, l'impact de la température sur les propriétés mécaniques demeure un phénomène important qui doit être caractérisé. Ces études sont suivies d'une campagne d'essais mécaniques de traction, où l'on démontre les changements des propriétés mécaniques en fonction de ces conditions environnementales. Les échantillons orientés à 0° et 90° (sens chaîne ou trame) ne dépendent pas de manière significative de la température d'essai, même si la résistance et la déformation finale ont tendance à diminuer. Les domaines de comportement linéaires et non-linéaires des éprouvettes en cisaillement plan sont variables en fonction des températures. On constate cependant que seulement la partie non-linéaire est soumise à l'impact de l'environnement humide.

Abstract

Carbon fibre reinforced polyphenylene sulphide is widely adopted as an engineering material in aeronautical and automobile domains. This high performance thermoplastic composite is known for an impact, damage and chemical resistance. To the authors' knowledge, the moisture absorption capacity and desorption/absorption kinetics have not yet been studied in an in-depth manner due to the fact that the material is known for its low moisture absorption. We suggest a conditioning protocol to fully check the real influence of the small quantity of absorbed water. In addition, the impact of temperature on mechanical properties remains an important parameter that should be characterised. These studies are followed by a tensile test campaign, where the changes in mechanical properties are demonstrated as a function of these environmental conditions. Samples, oriented at 0° and 90°, do not significantly depend on the testing temperature, although, the ultimate strength and deformation tend to decrease. The linear and non-linear domains of specimens, dedicated for a pure shear loading, are variable with temperature. However, it can be seen that only its non-linear part is subjected to the impact of humidity.

Mots Clés : hygrométrie, température, PPS, propriétés mécaniques

Keywords : hygrometry, temperature, PPS, mechanical properties

1. Introduction

L'analyse présente fait partie d'un projet collaboratif associant le GeM et le CETIM et porte sur les

assemblages boulonnés précontraints de composites soumis à des conditions hygrothermiques. Afin d'analyser les assemblages, il est nécessaire au préalable de caractériser le comportement du matériau composite au moyen d'expériences mécaniques à différentes températures et pour différentes Humidités Relatives.

La science des matériaux dispose d'une large gamme de matériaux composites thermoplastiques et thermodurcissables pour les applications aéronautiques, aérospatiales et automobiles. Le polysulfure de phénylène (PPS) renforcé en fibres de carbone (CF), composite « haute performance », est largement utilisé dans l'industrie aéronautique en raison de ses bonnes propriétés mécaniques aux différents températures, sa résistance aux produits chimiques, ses propriétés hydrophobes etc. La combinaison des hautes performances du matériau à structure semi-cristalline allié à un renfort tissé de carbone est également la raison de la popularité des composites à matrice PPS dans l'industrie automobile. La semi-cristallinité de la matrice PPS assure pour le composite une grande résistance aux chocs, une bonne stabilité dimensionnelle et une bonne résistance à la fatigue. Les propriétés physiques, mécaniques et tribologiques en font un matériau à fort potentiel afin de réaliser des structures fortement chargées.

Au cours des conditions de service, les structures en matériaux composites peuvent être soumises à diverses conditions environnementales qui sont principalement les variations de température et d'hygrométrie. D'après l'analyse bibliographique, le vieillissement hygrothermique peut conduire à la détérioration de différentes propriétés physiques, surtout pour des températures extrêmes et des environnements très humides [1,2]. La diffusion de l'eau au sein du matériau contribue généralement à son expansion volumique et à une plus grande ductilité de la structure composite. Le PPS CF absorbe environ 0.13% de teneur en eau lorsqu'il est exposé à 85% d'HR et +80°C [3]. Cette teneur en eau est très faible et, par conséquent, souvent négligeable pour les ingénieurs et les scientifiques. En effet, pour des températures élevées les matériaux sèchent naturellement. L'étude approfondie des cinétiques de désorption et d'absorption d'eau dans le matériau composite va contribuer à mieux maîtriser la connaissance de la capacité hygroscopique des composites à matrice PPS et à renforts de carbone. De plus, la validation de l'impact des conditions environnementales sur le comportement mécanique du matériau PPS et des composites tissés à matrice PPS permettra construire une base expérimentale fiable. Ces essais pourront être utilisés pour valider des simulations numériques multi échelles destinées à la modélisation des assemblages boulonnés.

En ce qui concerne le comportement thermomécanique du composite tissé hors axe, il est guidé principalement par le comportement de sa matrice. Pour des conditions thermiques, tels que la température du matériau soit inférieure à la température de transition vitreuse (T_g) (égale à +90°C), le matériau composite possède une partie linéaire représentant les propriétés élastiques au début d'essai. En revanche, à proximité de la T_g le comportement devient non-linéaire dès le début de chargement en raison de la nature viscoplastique de la matrice [4–7].

Lorsque le renfort chaîne ou trame est orienté dans le sens de la sollicitation mécanique, le composite n'est plus gouverné par les propriétés de la résine, mais dominé par les torons de fibres ; il possède un comportement élastique fragile [2].

2. Caractérisation du matériau

Afin de tenir compte de la sensibilité aux conditions environnementales de composites à matrice thermoplastique, il faut analyser l'impact de l'environnement sur ses propriétés mécaniques. Dans le cadre de cette campagne expérimentale, nous avons d'abord effectué une étude sur la désorption/absorption de notre composite tissé carbone à matrice PPS afin de maîtriser pleinement sa teneur en humidité. Les éprouvettes ont été ensuite testées en traction afin de valider l'influence de l'humidité et de la température sur les propriétés mécaniques.

2.1 Préparation des éprouvettes

Le projet s'appuie sur l'étude d'un composite constitué tissé de fibres de carbone et de la matrice thermoplastique polysulfure de phénylène (PPS CF) de marque Tepex® Dynalite. Le renfort est un tissu sergé de 2×2 avec un taux de masse identique dans les sens longitudinal et transversal (chaîne et trame). Le stratifié est livré sous forme de plaques d'épaisseur totale de 1.5 mm (l'épaisseur des couches est donc de 0.25 mm). Selon la fiche technique de Tepex® Dynalite, la teneur en volume de fibres est 45 %. Les composites stratifiés ont été initialement stockés au laboratoire sous des conditions environnementales non contrôlées. Par conséquent, il est nécessaire de les conditionner afin de s'assurer de leurs teneurs en eau avant tout essai mécanique de caractérisation.

Les propriétés mécaniques apparentes de ce matériau composite orthotrope changent naturellement en fonction de l'orientation de la sollicitation par rapport aux directions des renforts. Par conséquent, le sens de cisaillement plan (45°) (Fig. 1) et le sens chaîne (0°) (Fig. 2) sont deux orientations essentielles à caractériser. Bien que le fournisseur nous ait indiqué que le tissu soit équilibré, nous avons souhaité également réaliser des essais dans le sens trame (90°) (Fig. 2) pour confirmer (ou non) cette hypothèse. La géométrie des éprouvettes pour les essais de cisaillement est de type rectangulaire de dimensions 250 mm×25 mm×1.5 mm. Cette géométrie est également utilisée pour la caractérisation de la teneur en eau. La géométrie des éprouvettes orientées à 0° et 90° comporte un rayon de courbure supplémentaire (Fig. 2) [8] afin d'assurer une rupture dans la partie centrale de l'éprouvette lors d'un essai de traction.

Les éprouvettes sont découpées au jet d'eau selon les dimensions et les orientations des fibres souhaitées. Toutes les éprouvettes sont ensuite référencées et stockées à condition ambiante. Après les procédures de désorption/absorption, les éprouvettes sont placées dans des sachets étanches. Chaque lot d'éprouvettes est étiqueté et testé mécaniquement après avoir été conditionné en environnement humide.

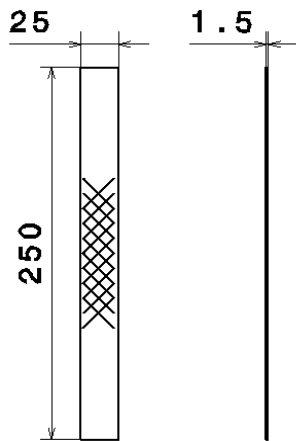


Fig. 1. Géométrie des éprouvettes de cisaillement

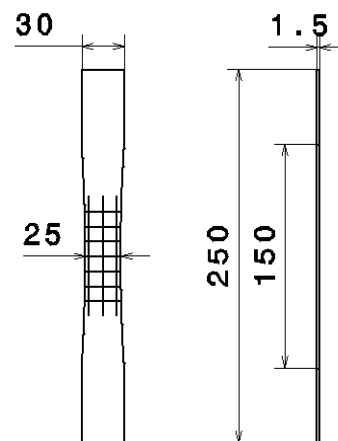


Fig. 2. Géométrie des éprouvettes sens trame et chaîne

2.2 Protocole de désorption/absorption

Selon la fiche technique du matériau PPS à renfort de carbone CF, sa température de transition vitreuse T_g est de +90°C à l'état sec. Pour accélérer la désorption, le matériau doit être soumis à une température supérieure à la température ambiante et inférieure à la T_g pendant un certain temps. Il convient de noter que l'utilisation d'une température élevée lors de la sorption ou désorption pourrait entraîner une modification du comportement du matériau. Afin d'évaluer l'influence des températures de séchage sur la cinétique de désorption et les propriétés mécaniques, nous avons sélectionné en regard de la T_g du PPS CF, trois températures : +70°C, +90°C et +120°C. Pour une

plus grande accélération de désorption, toutes les éprouvettes sont placées dans une étuve Binder VD-115 sous vide. La teneur en eau est déduite d'une analyse gravimétrique (ASTM D5229) en utilisant une balance de haute précision de 0.1 mg. Afin de maintenir la cohérence des résultats et d'éviter les erreurs probables en cours d'analyse, un minimum de trois éprouvettes est conditionné pour une température donnée.

La caractérisation approfondie en absorption du matériau composite nécessite également un protocole définissant la durée, la température et l'humidité relative. Pour ce faire, les éprouvettes après avoir été séchées sont exposées à un environnement contrôlé en humidité et température (Binder KMF-115) afin de suivre le taux d'absorption à HR 85%. Une température de +90°C est appliquée pour deux raisons : la proximité de la T_g et la capacité limite de l'enceinte climatique. Enfin c'est aussi la température qui a été retenue après l'exploitation du protocole de désorption (cf. la partie « résultats et discussions »).

2.3 Campagne d'essais

L'objectif de la campagne expérimentale est d'analyser les propriétés mécaniques du composite soumis à différentes conditions climatiques, telles que l'humidité relative et la température. Il est essentiel d'examiner l'influence de la gamme de températures auxquelles le matériau est utilisé dans l'aéronautique : de -50°C à +120°C. Ainsi, dans le cadre de nos recherches, deux extrema d'humidité relative sont appliqués : HR 0% et HR 85%. Malgré la limitation des conditions environnementales, les résultats permettront d'enrichir la base expérimentale de données pour ce matériau. La matrice d'essais est présentée dans Tab. 1.

Puisque les propriétés longitudinales et transversales sont présumées indépendantes des conditions environnementales (chaîne et trame), les essais sont réalisés uniquement à HR 0%. Etant donné que le comportement mécanique des éprouvettes à 45° est dominé par la matrice PPS, il est affecté de manière significative par la température voire par l'humidité. Les essais destinés à quantifier l'effet de l'humidité et de la température sont effectués sur une machine d'essai Instron 5584 à une vitesse de sollicitation de 2 mm/min et jusqu'à la phase ultime de la rupture. Pour chacun des essais, nous avons relevé la valeur de la cellule force au cours du temps et nous avons filmé les essais. En effet, nous avons déposé sur chaque éprouvette un mouchetis et des jauges de déformation (sauf à 45°) qui permettent d'accéder à l'état de déformation sur la peau du matériau. Ces données de force et de déformations sont ensuite transformées pour obtenir les contraintes et déformations vraies du matériau au cours de l'essai [9], [10].

| Température | -50°C | | | +23°C | | | +90°C | | | +105°C | | | +120°C | | |
|-------------|-------|----|-----|-------|----|-----|-------|----|-----|--------|----|-----|--------|----|-----|
| HR 0% | 45° | 0° | 90° | 45° | 0° | 90° | 45° | 0° | 90° | 45° | 0° | 90° | 45° | 0° | 90° |
| HR 85% | 45° | - | - | 45° | - | - | 45° | - | - | 45° | - | - | 45° | - | - |

Tab. 1. Matrice des essais de traction réalisés

3. Résultats et Discussions

Quelques résultats issus des études de désorption et d'absorption illustrent cette partie. Ces derniers sont présentés sous la forme de la teneur en eau (C_{glob}) en fonction de la racine carrée du temps en secondes (Fig. 3 et 5). Nous présentons également des résultats issus de la caractérisation mécanique notamment aux températures positives.

3.1 Etude de désorption/absorption

La première partie de cette étude est relative à la désorption des éprouvettes jusqu'à HR 0%, c'est-à-dire jusqu'à avoir un « état sec » qui, théoriquement, correspond à l'absence d'humidité dans la phase amorphe de la résine du matériau composite tissé. La comparaison des trois températures de

désorption (Fig. 3) nous montre des cinétiques semblables pour +90°C et +120°C, tandis que l'on observe une cinétique légèrement différente +70°C. Au bout d'une semaine, le taux de perte d'humidité est quasiment égal pour les températures supérieures ou égales à la T_g . De plus, la désorption prolongée à +90°C ne démontre pas de détérioration chimique au cours du temps par l'absence de la brusque perte de masse. On remarque aussi qu'en baissant la température pour la désorption (+70°C) il est nécessaire d'accroître considérablement le temps de « séchage » puisqu'une certaine teneur en eau est toujours présente au sein des éprouvettes [11]. Suite à la procédure de désorption, on constate que le composite initialement fabriqué et conditionné à l'air libre ambiant contient environ 0.065% d'humidité.

Afin de vérifier la dégradation des propriétés mécaniques suite à la désorption, nous avons effectué des essais de traction sur chaque lot d'éprouvettes ensaché préalablement à température ambiante (+23°C) (Fig. 4). Quelques variations du module et de la déformation de cisaillement ont été observées. Cependant, de manière générale aucune dépendance à la température de conditionnement n'est visible à l'exception de +120°C dans le domaine non-élastique. Cela nous permet de sélectionner +90°C comme température de désorption et, également, d'absorption. Sous cette température, le protocole de désorption nécessite donc une semaine.

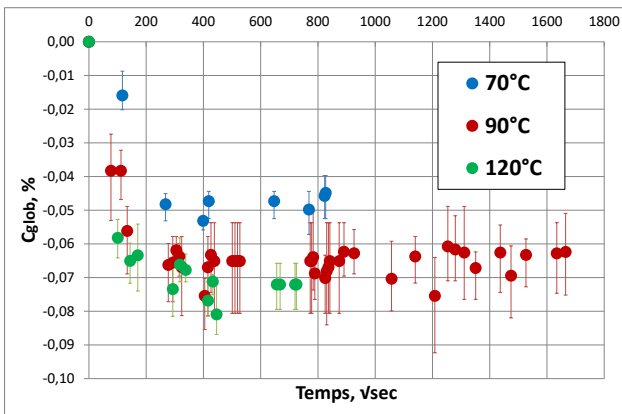


Fig. 3. Etude de désorption du PPS CF en fonction de la température

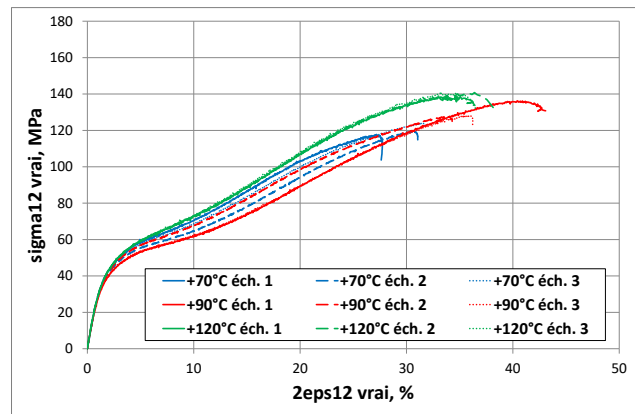


Fig. 4. Comportement mécanique du composite en cisaillement à l'état sec. Etude d'influence des températures de désorption : +70°C, +90°C et +120°C.

Les résultats de la campagne expérimentale de vieillissement humide menée (Fig. 5) permettent de déterminer les cinétiques d'absorption du matériau composite à HR 50% et à HR 85%. On remarque tout d'abord une dispersion dans les résultats expérimentaux qui peut être expliquée par des mesures difficiles à mener car les éprouvettes absorbent une faible quantité d'eau. La teneur en eau est plus importante à RH 85% et égale à 0.0937%, ce que est proche des résultats obtenus dans la littérature [3,12]. Il nous faut environ 12 jours à HR 50%/+90°C et 16 jours à HR 85%/+90°C (Tab. 2) pour obtenir une teneur en eau stabilisée. Ces paramètres sont, par la suite, utilisés afin de préparer les éprouvettes pour la campagne expérimentale de caractérisation mécanique en traction.

| Paramètres de conditionnement | C_{glob} , % | Durée, jours |
|-------------------------------|----------------|--------------|
| 90°C, sous vide, HR 0 | ~0 | 7 |
| 90°C, HR 50 | 0.0384 | 12 |
| 90°C, HR 85 | 0.0937 | 16 |

Tab. 2. Conditionnement des éprouvettes composites tissées PPS/ CF.

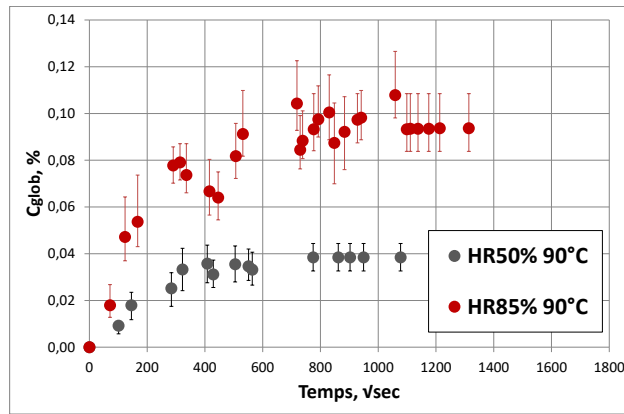
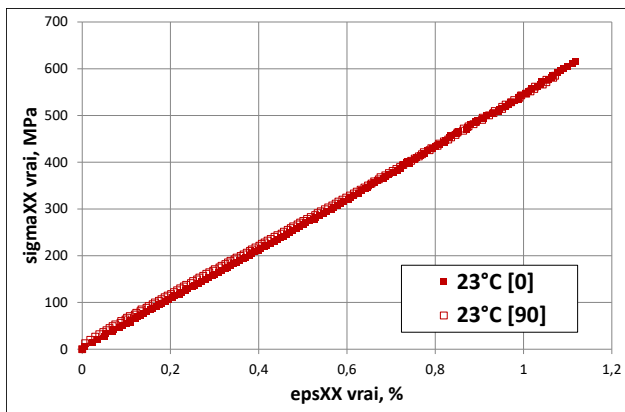


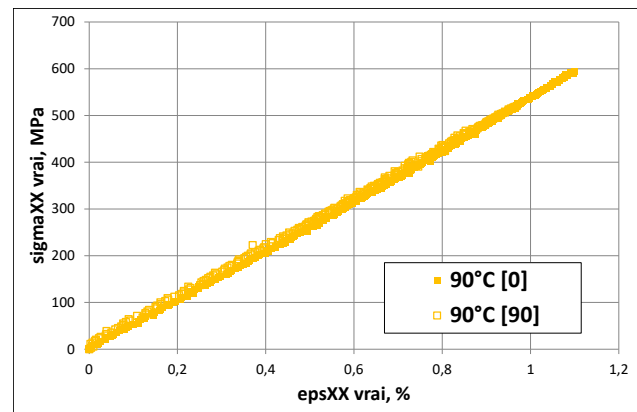
Fig. 5. Etude de vieillissement du tissé PPS/ CF en fonction d'humidité relative

3.2 Propriétés mécaniques de PPS CF

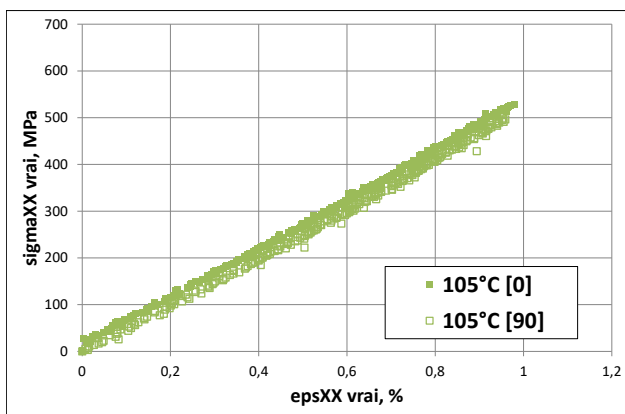
Dans un stratifié tissé équilibré, les propriétés longitudinales (chaîne) et transversales (trame) sont théoriquement égales. Néanmoins, la réponse mécanique réelle peut légèrement différer en raison du processus de fabrication du matériau. Les essais réalisés ont permis d'obtenir les propriétés mécaniques du composite en fonction du niveau de HR et de la température.



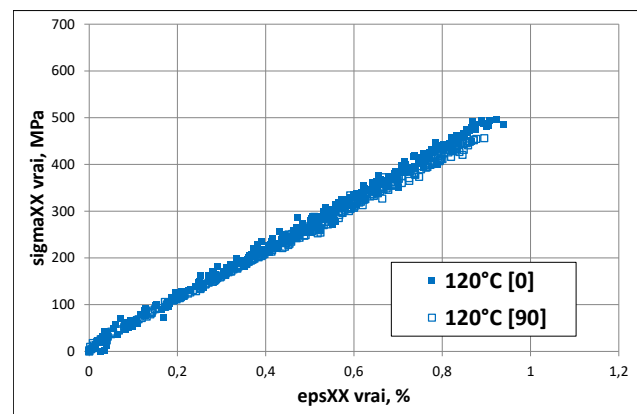
a)



b)



c)



d)

Fig. 6. Comportement mécanique du composite à 0° et 90° en traction à l'état sec. Chaque couleur correspond à une température d'essai : a) +23°C, b) +90°C, c) +105°C, d) +120°C

La Fig. 6 présente les courbes contrainte-déformation dans les sens chaîne ou trame en fonction de la température de l'essai pour une HR de 0%. En ce qui concerne l'impact de la température sur les propriétés mécaniques, les modules d'élasticité restent globalement inchangés sur toute la plage de température testée. On peut noter néanmoins une légère augmentation à +120°C (Tab. 3), également soulignée dans les publications [1,13]. Une rupture fragile (Fig. 8a) se propage perpendiculairement à l'axe de mise en charge. La comparaison des orientations longitudinales et transversales montre que les propriétés longitudinales (sens chaîne) sont légèrement supérieures à celle de la trame. Cette différence peut s'expliquer par la méthode de tissage : les fils de trame sont soumis à des ondulations afin de créer un motif de tissage alors que les fils de chaîne restent fixes et en tension. Les contraintes et les déformations à la rupture sont équivalentes à +23°C et +90°C, mais elles ont tendance à diminuer à +105°C et +120°C.

| Température | +23°C/HR 0% | | +90°C/HR 0% | | +105°C/HR 0% | | +120°C/HR 0% | |
|-------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|
| | E_{xx}, MPa | $\sigma_{0,xx}, MPa$ | E_{xx}, MPa | $\sigma_{0,xx}, MPa$ | E_{xx}, MPa | $\sigma_{0,xx}, MPa$ | E_{xx}, MPa | $\sigma_{0,xx}, MPa$ |
| 0° | 54104 | 523.99 | 53703 | 468.71 | 52451 | 467.71 | 58012 | 474.72 |
| | ±1385 | ±127.37 | ±3033 | ±123.89 | ±2587 | ±114.43 | ±6671 | ±29.57 |
| 90° | 53443 | 536.68 | 51135 | 398.25 | 49028 | 415.96 | 55848 | 457.25 |
| | ±1089 | ±120.45 | ±1069 | ±36.31 | ±1918 | ±67.61 | ±2234 | ±12.11 |

Tab. 3. Les propriétés mécaniques du PPS CF à 0° et 90° en fonction la température à HR 0% : module de traction et contrainte limite d'élasticité.

En observant la Fig. 7, les courbes de contrainte – déformation en cisaillement montrent un effet de l'humidité en fonction des températures testées sur les domaines linéaires et non-linéaires. Autour des températures +90°C, +105°C et +120°C (Fig. 8c) le composite présente un l'état ductile comportant une zone plastique lors de l'essai. Par conséquent, le module de cisaillement baisse d'une manière significative au-delà de +90°C (Tab. 4) [1,13]. Il est également intéressant de mentionner une remarquable augmentation de la déformation totale avec la hausse de température (Fig. 8b et 8c). Cet effet de température est majoré par une réorientation des fibres au cours d'essais à 45°, également observée par [1,13]. L'effet de réorientation est bien visible sur les éprouvettes dans leur état post mortem (Fig. 8). Le faciès de rupture des éprouvettes est cohérent avec l'orientation des fibres, pourtant, le type de fissure est plutôt fragile pour +23°C et, en revanche, il a la nature ductile à +120°C.

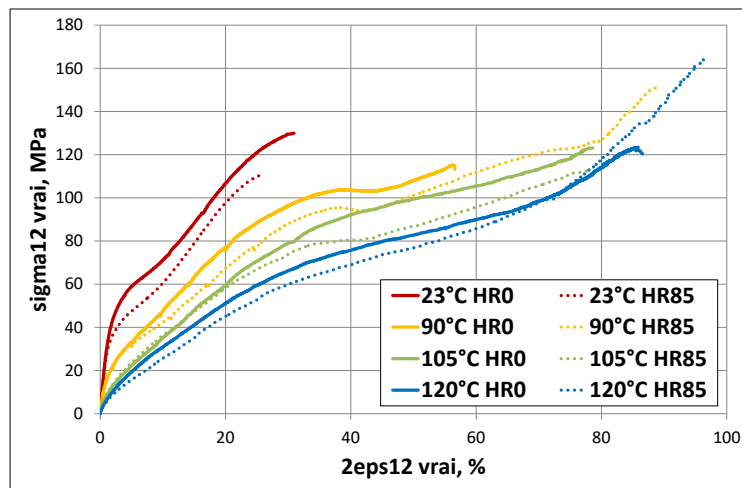


Fig. 7. Comportement mécanique du composite en cisaillement à l'état sec et HR 85%.

Bien que la teneur en eau soit modérée au sein des éprouvettes, on remarque que l'humidité a un impact visible notamment sur la partie non linéaire du comportement : les déformations à rupture

sont généralement plus importantes à HR 85% qu'à HR 0% alors que les niveaux de contraintes sont « plus faibles ».

| Température | +23°C | | +90°C | | +105°C | | +120°C | |
|-------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|
| | G_{12}, MPa | $\sigma_{0,12}, MPa$ | G_{12}, MPa | $\sigma_{0,12}, MPa$ | G_{12}, MPa | $\sigma_{0,12}, MPa$ | G_{12}, MPa | $\sigma_{0,12}, MPa$ |
| HR 0% | 3554 | 12.55 | 3418 | 5.29 | 1290 | 5.33 | 630 | 6.89 |
| | ±321 | ±10.43 | ±1805 | ±4.85 | ±233 | ±3.25 | ±219 | ±3.74 |
| HR 85% | 3669 | 9.86 | 2992 | 7.41 | 1390 | 3.25 | 543.8 | 7.03 |
| | ±955 | ±6.52 | ±1026 | ±3.75 | ±902 | ±3.79 | ±56 | ±2.44 |

Tab. 4. Propriétés mécaniques du PPS CF à 45° en fonction des conditions hygrothermiques : module de cisaillement et contrainte limite d'élasticité.

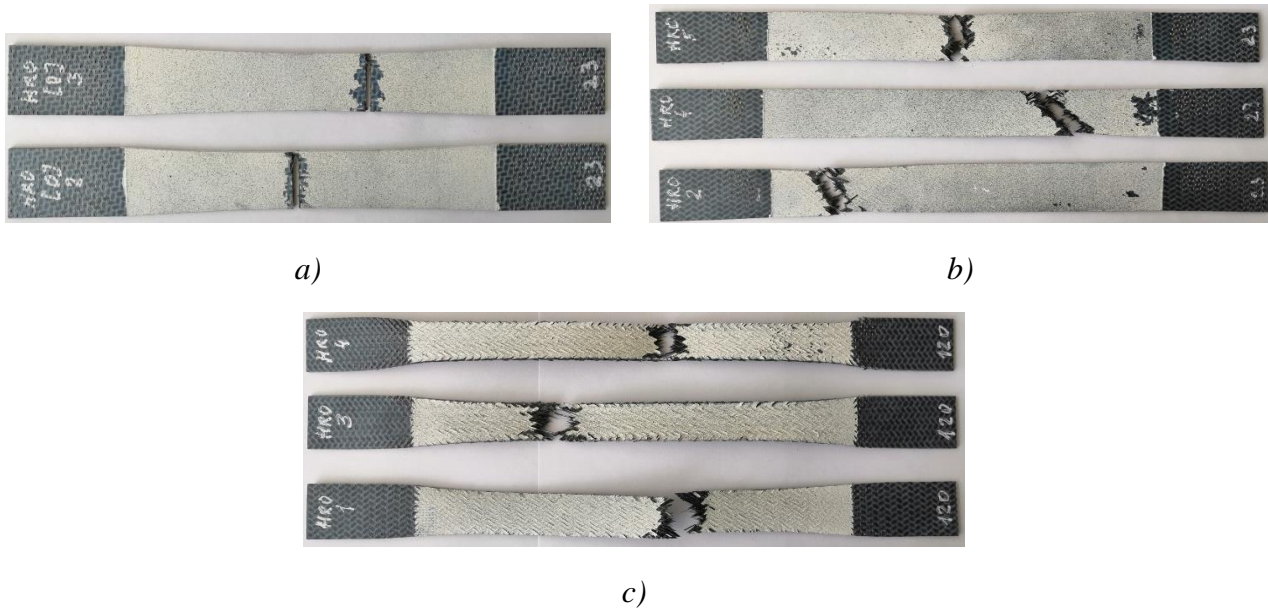


Fig. 8. Eprouvettes rompues suite aux expériences de traction : a) 0° : +23°C/HR 0%, b) 45° : +23°C/HR 0%, c) 45° : +120°C/HR 0%.

4. Conclusions

Dans cette étude, nous avons à la fois développé un protocole de conditionnement hygroscopique et caractérisé un matériau composite tissé à matrice PPS et à torons de fibre de carbone CF pour différentes températures et différents niveaux de HR. L'importance de la prise en compte des températures pour le dimensionnement de pièces et, notamment, d'assemblages vissés de plaque de carbone PPS tissé est démontrée. Lorsque le composite est utilisé au-delà de sa T_g , la nature de matériau change et il devient alors plus ductile, ce qui provoque une chute de ses propriétés mécaniques. La teneur en eau ne démontre pas d'effets importants même si l'on peut constater que le composite a tendance de se déformer plus. Ceci est valable tant que le comportement du matériau est dominé par la matrice PPS. Quant aux propriétés chaîne et trame du composite, un léger changement de module est observable à +120°C, sinon dans tous les autres cas, la température n'a pas d'impact significatif sur le comportement mécanique.

La base des résultats expérimentales obtenus sur le matériau composite, enrichie en perspectives par les données de la résine seule PPS, va servir par la suite à une étude numérique de Volume Élémentaire Représentatif du composite en fonction des conditions environnementales. Cette étude, ayant pour le but de fournir l'ensemble des propriétés mécaniques du matériau, est particulièrement nécessaire pour l'estimation des propriétés hors plan qui sont de première importance pour les

assemblages boulonnés, mais complexes à obtenir expérimentalement. Ces données seront ensuite intégrées dans les calculs et dimensionnements des assemblages boulonnés précontraints.

Références

- [1] Vieille B, Taleb L. About the influence of temperature and matrix ductility on the behavior of carbon woven-ply PPS or epoxy laminates: Notched and unnotched laminates. *Compos Sci Technol* 2011;71:998–1007. doi:10.1016/j.compscitech.2011.03.006.
- [2] Vieille B, Aucher J, Taleb L. Influence of temperature on the behavior of carbon fiber fabrics reinforced PPS laminates. *Mater Sci Eng A* 2009;517:51–60. doi:10.1002/adv.20239.
- [3] Ma C, Yur S. Environmental effects on the water absorption and mechanical properties of carbon fiber reinforced PPS and PEEK composites. Part II. *Polym Eng Sci* 1991;31:34–9. doi:10.1002/pen.760310107.
- [4] Kawai M, Yajima S, Hachinohe A, Kawase Y. High-temperature off-axis fatigue behaviour of unidirectional carbon-fiber-reinforced composites with different resin matrices. *Compos Sci Technol* 2001;61:1285–302. doi:10.1016/S0266-3538(01)00027-6.
- [5] Deng S, Li X, Lin H, Weitsman YJ. The non-linear response of quasi-isotropic composite laminates. *Compos Sci Technol* 2004;64:1577–85. doi:10.1016/j.compscitech.2003.11.011.
- [6] Kawai M, Masuko Y, Kawase Y, Negishi R. Micromechanical analysis of the off-axis rate-dependent inelastic behavior of unidirectional AS4/PEEK at high temperature. *Int J Mech Sci* 2001;43:2069–90. doi:10.1016/S0020-7403(01)00029-7.
- [7] De Baere I, Van Paepegem W, Degrieck J. Modelling the Nonlinear Shear Stress–Strain Behavior of a Carbon Fabric Reinforced Polyphenylene Sulphide From Rail Shear and [(45,-45)]_{4s} Tensile Test. *Polym Compos* 2009;1016–26. doi:10.1002/pc.
- [8] De Baere I, Van Paepegem W, Hochard C, Degrieck J. On the tension-tension fatigue behaviour of a carbon reinforced thermoplastic part II: Evaluation of a dumbbell-shaped specimen. *Polym Test* 2011;30:663–72. doi:10.1016/j.polymertesting.2011.05.005.
- [9] Lemaitre J, Chaboche J-L, Benallal A, Desmorat R. *Mécanique des matériaux solides*. 3rd ed. Dunod; 2009.
- [10] Pivdiablyk I, Rozycki P, Gornet L, Jacquemin F, Auger S, Nantes EC De. Behaviour of Bolted Composite Joints in Hygro-Thermal Environments 2018:24–8.
- [11] Obeid H. Durabilité de composites à matrice thermoplastique sous chargement hygro-mécanique: étude multi-physique et multi-échell des relations microstructure -propriétés-états mécaniques. Université de Nantes, 2016.
- [12] Blond D, Vieille B, Gomina M, Taleb L. Correlation between physical properties, microstructure and thermo-mechanical behavior of PPS-based composites processed by stamping. *J Reinf Plast Compos* 2014;33:1656–68. doi:10.1177/0731684414541846.
- [13] Vieille B, Aucher J, Taleb L. Comparative study on the behavior of woven-ply reinforced thermoplastic or thermosetting laminates under severe environmental conditions. *Mater Des* 2012;35:707–19. doi:10.1016/j.matdes.2011.10.037.