

Potentialités et limites des structures composites à enroulement circonférentiel pour des applications sur machine tournante

V. PLACET^a, F. TRIVAUDEY^a, S. CARBILLET^a, H. MEI^b, V. GUICHERET-RETEL^a, L. BOUBAKAR^a

a. FEMTO-ST – Département Mécanique Appliquée - UMR CNRS 6174, 24 rue de l'Épitahe, F-25000 BESANCON

b. National Key Laboratory of Thermostructure Composite Materials - Northwestern Polytechnical University, XI'AN, Chine

Résumé :

L'objectif du travail présenté est d'évaluer la pertinence de l'utilisation de structures composites à enroulement purement circonférentiel pour des applications sur machines tournantes, et plus précisément pour la réalisation de rotors de volant d'inertie. Une étude expérimentale permettant de déterminer la rigidité et la résistance de ce type de structure à l'échelle d'éprouvettes de laboratoire est proposée. La résistance des composites UD est généralement assimilée au comportement de la fibre dans la direction des fibres et au comportement de la matrice des directions transverses. Cependant les résultats expérimentaux présentés ici montrent clairement dans le cas des structures tubulaires une défaillance prématurée dans ces directions, loin des limites à rupture de la fibre et de la matrice. Le mode d'endommagement est identifié par des observations macroscopiques et grâce à l'enregistrement de l'activité acoustique pendant le chargement. Il est attribué à la fissuration de la matrice dans les 2 cas. Des observations microscopiques sur éprouvettes vierges montrent clairement l'existence de microfissures matricielles et d'une ondulation des fibres, résultant vraisemblablement des contraintes internes générées lors de la fabrication du matériau (polymérisation/refroidissement). Ces défauts altèrent la résistance du matériau et le potentiel restant se trouve fortement diminué dans les différentes directions matérielles. La mise en place d'un renfort fibreux dans les directions transverses est ici préconisée.

Abstract :

The objective of this work is to evaluate the relevance of the use of composite flywheel rotors with the fibre reinforcements oriented in the circumferential direction. An experimental campaign based on laboratory coupons is proposed to determine the rigidity and the resistance of this type of structure. The resistance of the UD composites is generally considered from a theoretical point of view to be equivalent to the fibre resistance in the fibres direction and to the matrix in the transverse directions. However, our experimental results clearly evidence a premature failure with a rupture value far from the one expected when taking into account both the fibre and matrix rupture values. Macroscopic observations and acoustic activities allow to attribute this premature failure to matrix cracking and opening. Microscopic observations of the virgin specimen clearly evidence matrix micro-cracks and fibre waviness, certainly involved by the composite manufacturing process. These defaults reduce the resistance of the specimen in both directions. A transverse reinforcement is advocated in this case to achieve a high resistance level.

Mots clefs : rotor, composites, enroulement circonférentiel, Pression interne

1 Introduction

Dans le contexte de la crise énergétique actuelle, les matériaux composites représentent une alternative intéressante aux matériaux traditionnels métalliques. Ils présentent effectivement une résistance mécanique spécifique largement supérieure à la plupart des alliages métalliques et constituent une ressource prometteuse, en particulier dans les secteurs industriels du transport terrestre et aérien où l'allègement des structures devient un enjeu à la fois économique et écologique. L'utilisation des matériaux composites est en particulier envisagée dans des technologies émergentes de stockage de l'énergie électrique à bord des véhicules, comme par exemple dans les rotors d'inertie. Ces derniers sont des systèmes de stockage de l'énergie cinétique qui présentent l'avantage majeur, par rapport aux autres technologies de stockage, de pouvoir emmagasiner ou

restituer l'énergie sur des temps extrêmement courts (de l'ordre de la seconde ou de la fraction de seconde). L'énergie cinétique est stockée dans une pièce massive en rotation appelée rotor. Les premières applications ont vu le jour dans le domaine de l'aérospatial en remplacement des batteries chimiques traditionnelles et plus récemment dans le transport terrestre [1]. Ces technologies prometteuses requièrent, pour aboutir au stade industriel, une amélioration des connaissances sur la tenue aux défauts et à la fatigue des structures composites. Malgré les efforts de recherche entrepris ces dernières années, cette question reste ouverte et soulève de nombreuses interrogations tant sur le plan fondamental que technologique. Les enjeux majeurs se situent autour du développement de méthodes et outils de dimensionnement mécano-fiabilistes et d'investigations expérimentales. Les contraintes inertielles dans un volant d'inertie en fonctionnement sont dominantes dans la direction circonférentielle. Pour cette raison, les rotors en composite sont souvent réalisés par enroulement filamentaire avec les renforcements fibreux orientés préférentiellement dans cette direction. La revue de la littérature souligne, dans le cadre de cette solution technologique, l'apparition de défaillances prématurées du rotor, dues à l'apparition de fissures ou au délaminage [1-5]. Effectivement, des contraintes axiales (σ_{ZZ}) et radiales (σ_{RR}) sont également générées lors du fonctionnement du volant d'inertie. Celles-ci sont souvent négligées, leur niveau étant, en fonction de la géométrie et de la conception du rotor, de l'ordre de 10 fois inférieures aux contraintes circonférentielles ($\sigma_{\theta\theta}$) [2]. Considérant la forte anisotropie de la résistance des composites unidirectionnels (UD), où la résistance en transverse est de l'ordre de 30 fois inférieure à celle de la résistance longitudinale pour les composites carbone/époxy par exemple, la question de la pertinence de cette hypothèse peut être soulevée. Ce travail a pour objectif d'apporter un éclairage sur cette question. Une étude expérimentale de la résistance statique et en fatigue de structures tubulaires carbone/époxy à enroulement circonférentiel est proposée.

2 Matériels et méthodes

Les essais sur rotor sont coûteux et requièrent des dispositions de sécurisation des dispositifs d'essais conséquentes. Pour ces raisons, des essais quasi-statiques sont souvent préférés aux essais dynamiques. Ces tests peuvent être réalisés sur des anneaux de rotor (Hydroburst tests [6], Split disk method [ASTM D2290]) ou sur des éprouvettes tubulaires [ASTM D2992]. Dans le cadre de ce travail, nous avons favorisé des éprouvettes tubulaires dont les dimensions sont compatibles avec les machines d'essai universelles de laboratoire.

2.1 Matériau

Le matériau utilisé est un composite à fibres de carbone (T700) et résine époxy (M18). Le pré-impregné est fourni par Hexcel Composite (Hexply). Des éprouvettes tubulaires à section cylindrique, de diamètre intérieur 60 mm et de longueur 360 mm sont fabriquées par enroulement filamentaire. Ces éprouvettes sont composées de 6 couches, conduisant à une épaisseur au rayon variant entre 2 et 2,5 mm. Ces dimensions permettent de respecter les prescriptions habituelles pour les éprouvettes tubulaires à parois minces, à savoir : un rapport rayon/longueur inférieur à 0,1 et un rapport rayon/épaisseur supérieur à 10 [7]. Les éprouvettes sont débitées dans une même barre de 3m de longueur. 2 barres différentes sont fabriquées avec les séquences d'enroulement suivantes : $[(90^\circ)_6]$ et $[(90^\circ)_2/(+/-20^\circ)_1/(90^\circ)_2]$. L'angle est mesuré par rapport à la direction axiale de l'éprouvette. Le taux de résine, la densité et la porosité du matériau composite ont été déterminées conformément aux normes ASTM D2584, D792 et D2734.

2.2 Essais mécaniques

3 éprouvettes de chaque séquence d'enroulement sont testées en traction jusqu'à rupture sur une machine hydraulique Instron 8501 d'une capacité 100kN. Les éprouvettes sont ancrées à l'aide de mors coniques. La vitesse de chargement est de 0.3 kN.s^{-1} . Les déformations sont mesurées par des jauges de déformations (Rectangular Rosette CEA 06-250 UR 350), dont les signaux sont conditionnés par des systèmes Vishay 2120. La contrainte axiale à rupture ($\sigma_{ZZ\max}$), les déformations à rupture ($\epsilon_{\theta\theta\max}$, $\epsilon_{ZZ\max}$), les coefficients de Poisson et le module d'Young longitudinal apparent (E_{ZZ}) sont déterminés pour chaque éprouvette.

3 éprouvettes de chaque séquence d'enroulement sont également testées en Pression Interne Pure (PIP) jusqu'à rupture. La pression est appliquée grâce à un multiplicateur de pression d'une capacité 2000 bars, équipé d'une électronique et d'un logiciel de pilotage TEMA. La vitesse de chargement est de 5 bar.s^{-1} . Les déformations sont mesurées suivant la méthode décrite précédemment. La contrainte circonférentielle à rupture ($\sigma_{\theta\theta\max}$), les déformations à rupture ($\epsilon_{\theta\theta\max}$, $\epsilon_{ZZ\max}$), les coefficients de Poisson et le module d'Young

circconférentiel apparent ($E_{\theta\theta}$) sont déterminés pour chaque éprouvette.

Des essais de fatigue sont également réalisés avec ce même dispositif sur les éprouvettes à enroulement circconférentiel. Des contraintes sinusoïdales ondulées asymétriques de fréquence 3 Hz sont appliquées aux éprouvettes avec un rapport R de 0.1, la contrainte max variant de 45 à 70% de la contrainte à rupture déterminée en quasi-statique. La limite d'endurance est déterminée à partir de la courbe de Wöhler.

2.3 Suivi de l'endommagement

Une chaîne d'émission acoustique EPA (Euro Physical Acoustics) est utilisée pour enregistrer l'activité acoustique générée au cours des essais quasi-statiques et de fatigue. Les caractéristiques des ondes élastiques générées dans le matériau, permettent d'identifier et de localiser l'endommagement. Les signatures acoustiques des différents types d'endommagement (fissuration de matrice, décohésion fibres/matrice et rupture de fibres) dans les composites à matrice organique sont relativement bien identifiées à ce jour.

La chaîne d'émission acoustique est composée de 4 capteurs piézoélectriques miniatures résonants 250-325 kHz, de 4 pré-amplificateurs avec filtre 20-1200 kHz, d'un ordinateur avec carte PCI et du logiciel AEwin.

3 Simulation numérique des essais

La simulation numérique des essais de pression interne et de traction a été effectuée avec le logiciel EF LSDyna. Le calcul est réalisé en 3D. Les éprouvettes calculées ont une séquence d'enroulement $[(90^\circ)_6]$. Les montages expérimentaux sont modélisés au plus près de la réalité : a) Concernant la pression interne par l'intermédiaire d'un bouchon intérieur sur lequel l'éprouvette peut glisser, une pression étant uniformément répartie sur la face intérieure du mors et de l'éprouvette, b) Concernant la traction, un mors en 3 parties, dont un cône fendu, empêche l'éprouvette de glisser, un effort de traction est appliqué directement sur le mors.

4 Modélisation du comportement des composites

Le comportement mécanique retenu pour ces composites à fibres longues est élastique linéaire à isotropie transverse. Une loi des mélanges a permis d'obtenir les caractéristiques mécaniques de la couche à partir de celles des différents constituants fournies par le fabricant. Les valeurs retenues à l'échelle du pli pour le module longitudinal sont 105 GPa, le module transverse 7,5 GPa, les modules de cisaillement plan et hors plan 4500 et 3125 MPa.

5 Résultats et discussions

Les essais mis en œuvre sur les éprouvettes tubulaires sont des essais non normalisés. Les calculs numériques permettent de vérifier la validité des essais et en particulier l'absence d'« effet tonneau » dans la configuration des essais de pression interne.

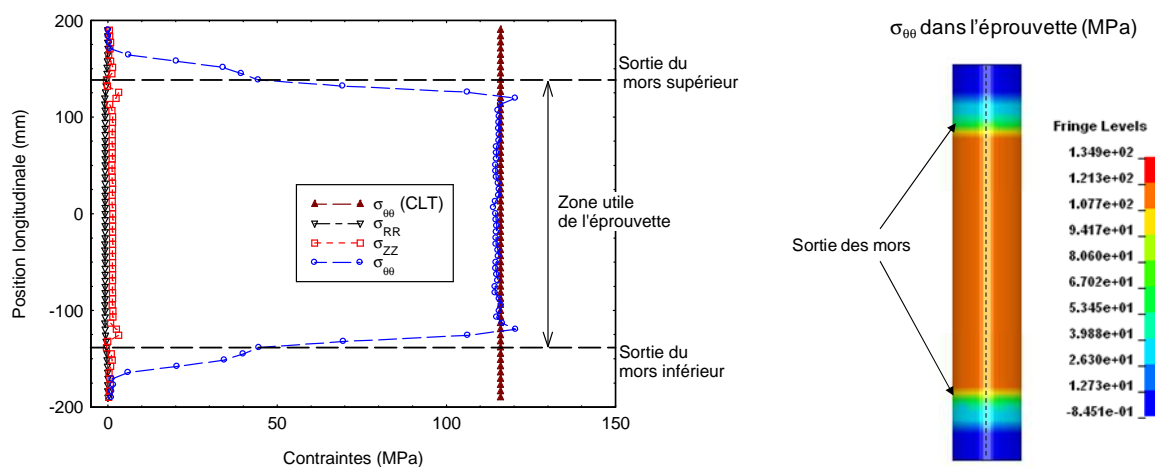


FIG. 1 – Simulation de l'essai de PIP pour une éprouvette à enroulement purement circconférentiel

Les calculs confirment plus exactement que dans le cas des essais de traction et de pression interne: (i) l'état de contrainte est uniaxial, (ii) le niveau de contrainte est uniforme dans la zone utile de l'éprouvette, (iii) aucune singularité n'est visualisée en sortie des mors. La Figure 1 propose quelques résultats des calculs effectués pour l'essai PIP. Ces résultats numériques sont étayés par des mesures expérimentales effectuées grâce à une batterie de jauges de déformation collées à différentes cotes sur l'éprouvette. Les résultats expérimentaux montrent par exemple que la variation des mesures des déformations circonférentielles sur l'essai de pression interne n'excède pas 4% de la valeur moyenne sur toute la hauteur de l'éprouvette. Les propriétés mécaniques des éprouvettes testées, rigidité et résistance, sont synthétisées dans le tableau 1. Les propriétés élastiques mesurées sont en bon accord avec les calculs issus du modèle. Les paramètres de la loi des mélanges prennent en compte le taux de résine mesurée expérimentalement. Ces résultats mettent en exergue la grande rigidité des composites à fibres de carbone.

| Spécimen | | $E_{\theta\theta}$ (GPa) | E_{zz} (GPa) | $\nu_{\theta z}$ | $\nu_{z\theta}$ | $\sigma_{\theta\theta \max}$ (MPa) | $\sigma_{zz \max}$ (MPa) | $\epsilon_{\theta\theta \max}$ (%) | $\epsilon_{zz \max}$ (%) |
|---|-------|-----------------------------|-------------------|------------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| [[90°] ₆] | Exp. | 105 ±2.8 | 6.8 ±0.9 | 0.125 | 0.037 | 418 ±24.2 | 13 ±0.35 | 0.37 ±0.022 | 0.18 ±0.039 |
| | Model | 105 | 7.5 | 0.1 | 0.018 | / | / | / | / |
| [[90°] ₂ / (+/-20°) ₁ / (90°) ₂] | Exp. | 74 ±5.1 | 34.3 | 0.22 | 0.1 | 727 ±1.4 | > 210 | 0.79 ±0.011 | > 0.694 |
| | Model | 72 | 33 | 0.126 | 0.068 | / | / | / | / |

TAB. 1 – Quelques propriétés mécaniques des éprouvettes.

Les résistances de la structure à enroulement circonférentiel dans le sens des fibres (direction circonférentielle) et dans le sens transverse (direction axiale), sont quant à elles, largement inférieures aux valeurs délivrées par le fournisseur du prepreg pour des éprouvettes stratifiées (respectivement 418 MPa contre 1800 MPa pour $\sigma_{\theta\theta}$ et 13 MPa contre 80 MPa pour σ_{zz}).

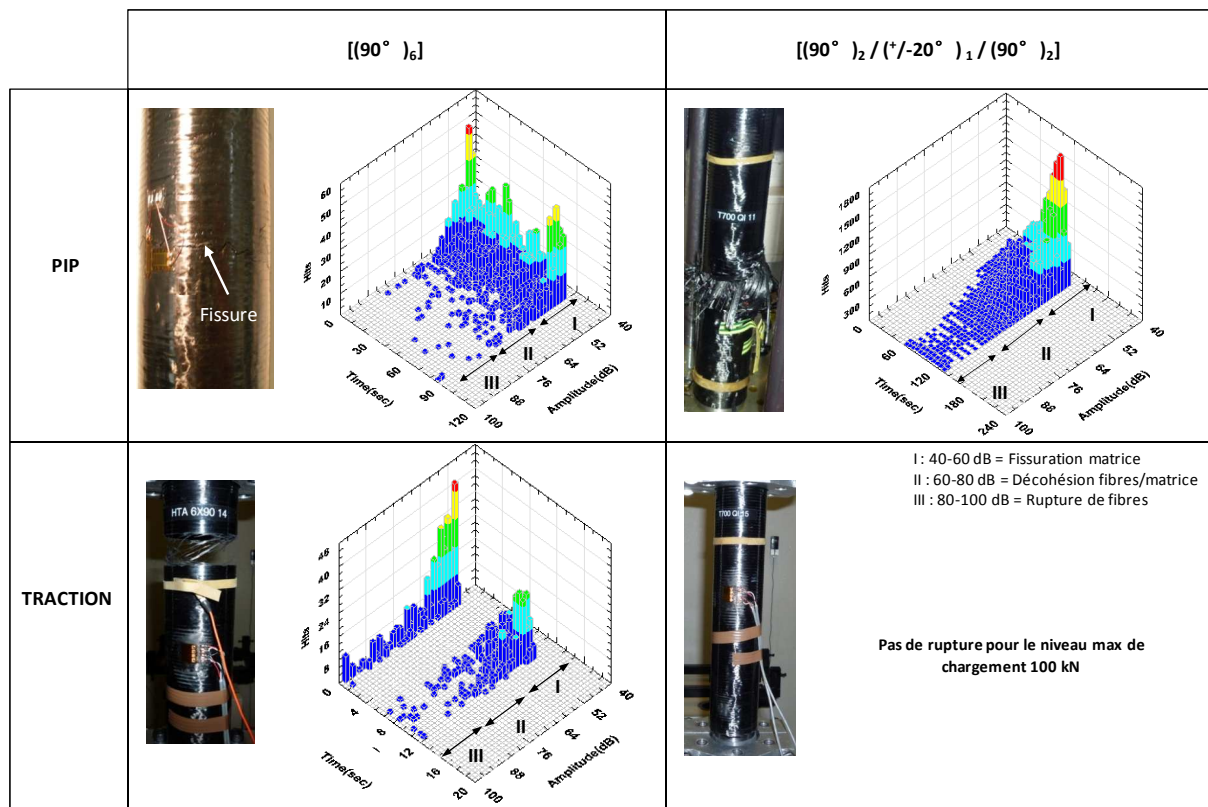


FIG. 2 – Faciès de rupture des éprouvettes et signatures acoustiques

Les observations macroscopiques des faciès de rupture ainsi que l'activité acoustique enregistrée au cours des essais (Fig. 2) nous permettent de conclure que la rupture observée sur ces structures à enroulement circonférentiel est provoquée par une fissuration de la matrice. Ce résultat est rationnel pour σ_{zz} , qui a été déterminé à partir de l'essai de traction, et qui reflète majoritairement le comportement de la matrice.

Si le mode de rupture est conforme aux attentes, la valeur de la contrainte ultime est elle inférieure de près de 55 MPa à celle attendue. La chute de la résistance de la matrice peut s'expliquer par : (i) un effet structural attribué à la géométrie de l'éprouvette (les données fournisseurs sont données pour des éprouvettes planes à comparer à la géométrie tubulaire), (ii) la présence de défauts, (iii) des contraintes internes naissant lors de la polymérisation et du refroidissement du matériau dans le processus de fabrication. L'existence de ces contraintes internes est souvent mise en avant et largement étudiée dans la littérature [8-12]. Certains auteurs montrent pour des éprouvettes planes, que les contraintes résiduelles peuvent engendrer la fissuration de la matrice, des désalignements et ondulations de la fibre [12].

Des observations microscopiques de la face intérieure de nos éprouvettes tubulaires vierges révèlent effectivement la présence de microfissures et une forte ondulation de la fibre (Fig. 3), traduisant l'expression de contraintes internes non négligeables. Cet état de contrainte interne associé aux défauts engendrés contribuerait ainsi à fortement diminuer le potentiel de la structure dans la direction transverse.

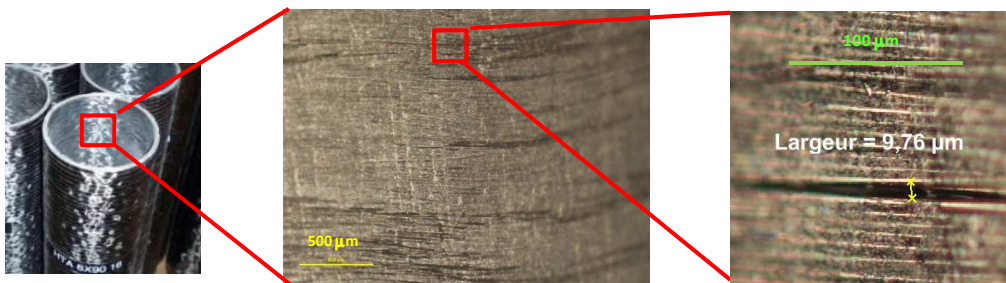


FIG. 3 – Images microscopiques mettant en évidence une microfissuration matricielle et l'ondulation des fibres.

Ces contraintes résiduelles et défauts dus au procédé de fabrication des éprouvettes tubulaires pourraient également expliquer la rupture prématurée observée pour les essais de pression interne. Contre toute attente, dans cette configuration la défaillance est effectivement provoquée par une fissuration de la matrice alors qu'une rupture des fibres serait attendue. Le chargement par application d'une pression génère nous l'avons vu des contraintes majoritairement circonférentielles. Des contraintes axiales et radiales, inférieures d'un facteur 100 aux contraintes circonférentielles (au plus quelques MPa), sont également provoquées. Celles-ci ont tendance à être négligées. Ce niveau de chargement dans les directions transverses, bien qu'anecdotique, semble néanmoins être suffisant pour engendrer une ouverture de la matrice à partir d'un niveau de pression seuil. L'ouverture de la matrice pourrait être incitée par le déploiement, ou plus exactement le redressement des fibres initialement ondulées, sous l'effet des contraintes circonférentielles.

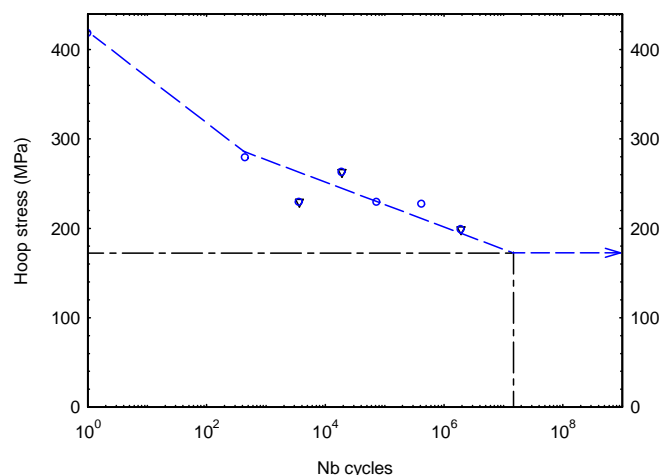


FIG. 4 – Courbe de Wöhler – Chargement PIP – Eprouvettes à enroulement purement circonférentiel.

Le comportement en fatigue se trouve également fortement affecté (Fig. 4) avec une limite d'endurance inférieure à 200 MPa, loin de celle espérée si le comportement de la structure pouvait être assimilé au comportement de la fibre dans la direction longitudinale.

La faiblesse des structures à enroulement circonférentiel dans les directions transverses incite donc à favoriser l'intégration de renforts dans ces directions pour réduire le degré d'anisotropie de la structure. Nous pouvons d'ailleurs constater que pour les structures avec des fibres redressées dans la direction transverse (bicouche central croisé à $\pm 20^\circ$), nous retrouvons un comportement plus prévisible (Tab. 1, Fig. 2) avec une contrainte à rupture moyenne légèrement supérieure à 700 MPa, valeur en accord avec les ordres de grandeur disponibles dans la littérature [13] et une rupture principalement provoquée par l'association de phénomènes de décohésion fibres/matrice et de rupture de fibres.

6 Conclusions

Ce papier met en évidence une rupture très prématurée des structures composites à enroulement circonférentiel sous sollicitation majoritaire circonférentielle à l'échelle d'éprouvette tubulaire de laboratoire. Contre toute attente, la rupture est provoquée, non pas par une rupture des fibres, mais par une fissuration de la matrice dans la direction transverse. La résistance transverse du composite, initialement très faible (moins de 30 fois celle de la direction de la fibre), semble être amoindrie pour les géométries considérées par les contraintes internes générées par la phase de polymérisation/refroidissement de la résine. Le potentiel restant de la structure dans la direction transverse est alors extrêmement faible, des contraintes transverses, 100 fois inférieures aux contraintes de la direction principale, peuvent alors entraîner la défaillance de la structure. Le renforcement des rotors composites dans les directions transverses est ainsi préconisé.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ANR pour le financement du projet VITFER (Stockage d'énergie par un système de Volant d'Inertie optimisé pour des applications de Transport FERroviaire) dans lequel ce travail s'intègre.

References

- [1] Ratner JKH., Chang JB., Christopher DA. Composite flywheel rotor technology – a review. Composite Materials: Testing and Design Fourteenth volume, ASTM STP 1436. E. Bakis Ed., 2003.
- [2] Pérez-Aparicio JL., Ripoll L. Exact, integrated and complete solutions for composite flywheels. Composite Structures 93, 1404-1415, 2011.
- [3] Mahieux CA. Cost effective manufacturing process of thermoplastic composites for the traditional industry: the example of a carbon-fiber reinforced thermoplastic flywheel. Composite Structures 52, 517-521, 2001.
- [4] Tzeng J., Emerson R., Moy P. Composite flywheels for energy storage. Composites Science and Technology 66, 2520-2527, 2006.
- [5] Wong JJM. Stress analysis and design of multi-ring fibre composite rotors. PhD thesis, Ottawa, Canada, 1982.
- [6] Thompson RC., Pak TT., Rech BM. Hydroburst test methodology for evaluation of composite structures. Composite Materials: Testing and Design Fourteenth volume, ASTM STP 1436. E. Bakis Ed., 2003.
- [7] Qi D., Cheng G. Fatigue behavior of filament-wound glass fiber reinforced epoxy composite tubes under tension/torsion biaxial loading. Polym Composite 28(1), 107-115, 2007.
- [8] Perreux D., Lazuardi D. The effects of residual stress on the non-linear behaviour of composite laminates. Part I: experimental results and residual-stress assessments. Compos Sci Technol 61, 167-175, 2001.
- [9] Perreux D., Lazuardi D. The effects of residual stress on the non-linear behaviour of composite laminates. Part II: layer, laminate non linear models and the effect of residual stress on the model parameters. Compos Sci Technol 61, 177-190, 2001.
- [10] Parlevliet PP., Bersee HEN., Beukers A. Residual stresses in thermoplastic composites – a study of the literature. Part I: Formation of residual stresses. Compos A 37, 1847-1857, 2006.
- [11] Parlevliet PP., Bersee HEN., Beukers A. Residual stresses in thermoplastic composites – a study of the literature. Part II: Experimental techniques. Compos A 38, 651-665, 2007.
- [12] Parlevliet PP., Bersee HEN., Beukers A. Residual stresses in thermoplastic composites – a study of the literature. Part III: Effects of thermal residual stresses. Compos A 38, 1581-1596, 2007.
- [13] Kaynak C., Salim Erdiller E., Parnas L., Senel F. Use of split-disk tests for the process parameters of filament wound epoxy composite tubes. Polymer testing 24, 648-655, 2005.