

Caractérisation expérimentale multi-instrumentée des endommagements dans les composites à renfort 3D

J. Henry^a, K. Khellil, Z. Aboura^b ...

a. Safran Aircraft Engines Site de Villaroche

b. Université de technologie de Compiègne Laboratoire Roberval
zoheir.aboura@utc.fr

Résumé

Ces travaux abordent la caractérisation expérimentale multi-instrumentée de l'endommagement en fatigue de matériaux composites à renfort 3D. Cette étude s'appuie sur une corrélation d'informations issues de la mesure de champs de déformations (CIN) de l'émission acoustique, de la thermographie infrarouge, d'observations optiques in situ et micro-tomographique. Des scénarii de mécanismes ont ainsi pu être proposées dans une optique de maîtriser le comportement des ces matériaux et d'alimenter des modèles prédictifs.

Mots clés I: fatigue ; matériaux composites ; renfort 3D, émission acoustique

1. Introduction

L'idée reçue selon laquelle les matériaux composites sont insensibles aux effets de fatigue reste vraie dans le cas des matériaux composites unidirectionnels à renfort carbone, de faibles épaisseurs et soumis à des chargements nettement en dessous de leurs limites ultimes [1]. En effet, une initiation de l'endommagement dans la résine n'affecte pas le comportement du composite qui est principalement géré par le comportement des fibres. Ce constat reste partiellement vrai dans le cas de stratifiés UD. L'initiation de l'endommagement et la propagation se font, d'une façon générale selon le schéma suivant : multi-fissuration de la matrice, coalescence des fissures, ruptures interfaciales, délaminage puis rupture des fibres [2]. Ce schéma d'endommagement dépend de la nature de la stratification et du renfort. Naik et al [3] rapportent que dans le cas d'un composite à renfort tissé, l'initiation de l'endommagement est fortement tributaire de la nature du tissage, du grammage et des zones d'entrelacement. Ces auteurs distinguent deux types d'endommagement :

- les micros-structuraux qui se produisent au sein des mèches et qui se traduisent par la microfissuration de la résine, le micro déchaussement de fibres et les ruptures locales de fibres
- les macroscopiques au sein du tissu et qui sont caractérisés par des ruptures transverses, des ruptures par cisaillement local dans les mèches sens chaîne, des délaminages inter plis et la rupture des plis.
-

Lorsque le renforcement se complexifie, les phénomènes d'endommagement qui en découlent sont encore plus complexes. Les travaux de Tsai [4] décrivent les phénomènes de dégradation pour des interlocks carbone/époxy d'épaisseur 1,5 et 2 mm et pour des fractions volumiques assez faibles

(0.25). Il propose cinq étapes différentes dans la dégradation du composite. Premièrement des fissures de surface transverses apparaissent et se propagent dans les torons de trame, dans la deuxième étape, des fissures toujours dans les torons transverses apparaissent à cœur à cause des concentrations de contraintes. Les deux premières étapes se produisent dans le premier dixième de la durée de vie totale. La troisième étape est la décohésion entre les torons de chaîne et de trame ainsi que la rupture de fibres dans la chaîne. Les décohésions s'agrandissent et coalescent au niveau de l'interface entre le toron et la matrice lors de la quatrième phase, tandis que les ruptures de fibres s'accroissent. Les troisième et quatrième étapes sont les phases critiques de l'endommagement. Enfin, la rupture finale, due à l'accumulation d'endommagement, est la cinquième étape.

J.Schneider et al et C. El Hage et al [5-6] ont montré que dans le cas du comportement en statique de composites à renfort interlock (même famille que celui de cette étude), les phénomènes d'endommagement en traction uni-axiale en statique génèrent des endommagements diffus dans toute l'épaisseur du matériau. Outre les phénomènes décrits plus haut, le chaînage entre plis génère localement des états de contraintes fortement perturbés par la présence d'un cisaillement intra-laminaire.

L'identification et le suivi de ces mécanismes nécessitent une multi-instrumentation (jauges d'extensométrie, émission acoustique, mesure des champs de déformation par corrélation d'images (DIC), vidéo microscopie, observations MEB post-mortem...). L'association et le traitement de l'ensemble de ces informations a permis de décrire finement les processus de ruine. Cette étude s'inscrit dans la continuité de ces travaux. Elle a pour but d'élaborer des scénarii de ruines dans le cas d'une sollicitation en fatigue sur des composites à renfort interlock et de comprendre l'effet de la fatigue sur l'évolution des mécanismes précédemment identifiés. La multi-instrumentation précédemment utilisée est complétée par la mesure de dissipation de chaleur à l'aide d'une caméra infra rouge. Un protocole d'essai est mis au point afin d'identifier les sites d'initiations et ensuite suivre le processus de propagation des endommagements. L'utilisation de l'émission acoustique est privilégiée dans ce sens. Elle permet d'accéder à des informations volumiques. Diverses études ont montré son intérêt et ont permis d'attribuer des mécanismes d'endommagements à des signatures acoustiques [7-9]. Néanmoins, le nombre important de signaux enregistrés impose le choix d'une stratégie pour le suivi des endommagements. Cet article présente la méthodologie mise au point et les principaux résultats obtenus.

2. Présentation du matériau

Les architectures de renforcements tridimensionnels permettent la réalisation de structures composites épaisses plus tolérantes à l'endommagement et plus résistantes en termes de contraintes hors plan et inter-laminaire. Les matériaux utilisés dans cette étude concernent plus spécifiquement le cas des renforts interlocks carbone couche-couche. La résine utilisée est une époxyde et les matériaux sont mis en œuvre par le procédé de RTM. L'architecture de renforcement tissu présente un Volume Élémentaire Représentatif (VER) atypique liant entre eux les plis adjacents (Fig. 1) afin d'éliminer le phénomène de délaminage usuellement rencontré dans les stratifications classiques. Cette originalité procure à la structure composite une étonnante capacité de dissipation d'énergie sous impact impliquant la réponse comportementale de l'armure tissée au travers des fibres, de la résine inter et/ou intra-mèches et des interfaces.

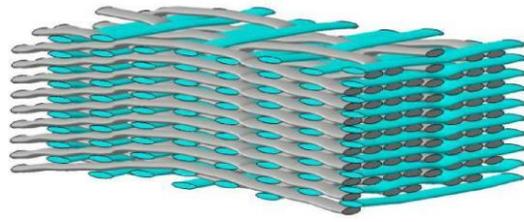


Fig. 1. Tissu multicouche interlock

3. Procédure expérimentale

Les éprouvettes utilisées en forme d'altères sont instrumentés d'un extensomètre disposant d'une plage de mesure de 50mm et positionné sur une tranche de l'éprouvette. L'autre tranche qui est polie servira à l'observation des mécanismes d'endommagement par vidéo-microscopie. Une des deux faces est peinte en noir pour la mesure du champ de température en surface et la seconde présente un mouchetis pour la mesure du champ de déformation par DIC. L'éprouvette est refroidie par un système de vortex tout au long de l'essai. Deux capteurs d'émission acoustique sont utilisés afin de localiser d'une part, l'avènement des premiers endommagements et d'autre part éliminer les éventuels bruits parasites issus du système d'introduction des efforts.

En début d'essai, l'éprouvette subit un chargement jusqu'à la charge maximale qu'elle verra lors des cycles de fatigues. Lors de cette montée en charge, la mesure des champs de déformation est effectuée accompagnée des observations par vidéo-microscopie. Ce protocole est répété à des intervalles réguliers lors du processus de fatigue permettant ainsi d'avoir des signatures à différents moments de la vie de l'éprouvette (Fig. 2). Trois rapports de charges ont été sélectionnés : $R=0,5$, $R=0,3$ et $R=0,01$ et les tests ont été menés selon les directions trame et chaîne du tissage.

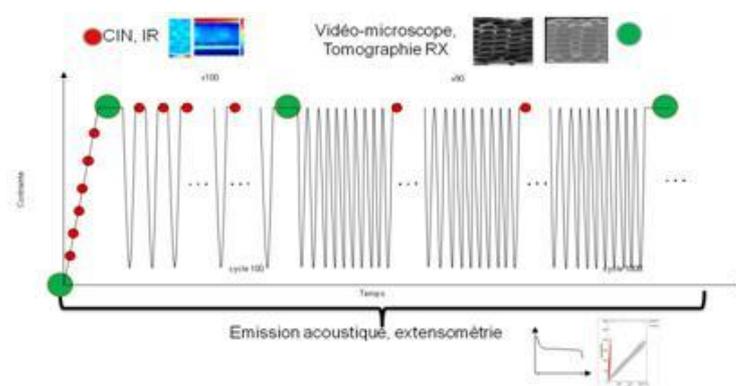


Fig. 2. Protocole de chargement type en traction uni-axiale

3 Principaux résultats

La procédure expérimentale mise en place a permis de proposer des scénarii d'endommagements propres à cette famille de matériaux en fatigue. Globalement, les principaux mécanismes identifiés rejoignent ceux identifiés à travers les travaux de J.Schneider.[5] et il ne semble pas que la fatigue modifie considérablement les scénarii. À titre d'exemple, on retrouve, dans le cas d'un chargement uni-axial en sens trame, le phénomène de cisaillement interlaminaire dû au déplacement relatif des colonnes de chaîne. Cela engendre des fissurations matricielles à 45° entre les torons de chaîne au sein de la matrice. Suite à une saturation de ces premiers endommagements, la fissure se propage en interlaminaire le long des torons de trame. Ce second type d'endommagement se concentre en

premier lieu dans les zones à fort embuvage avant propagation. La ruine est liée à la rupture des torrents. Ces mécanismes se produisent de manière tridimensionnelle comme l'a révélé les observations tomographiques. Ainsi la fissuration en cisaillement se produit aussi bien dans le plan 23 que dans le plan 13. La figure 3 schématise ces endommagements.

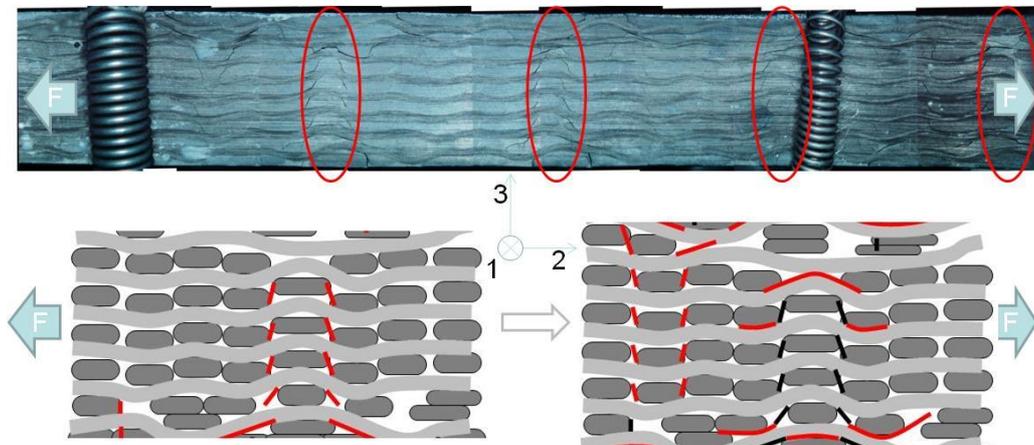


Fig. 3. Exemple de scénario d'endommagement identifié sur un essai de fatigue en sens trame $R=0,01$

Un second point notable concerne l'effet du rapport de charge. Ce dernier influe énormément sur la durée de vie du matériau, mais également sur la cinétique d'endommagement. Ainsi, pour un même niveau de chargement, un rapport de charge important génère une faible perte de rigidité comparativement au faible rapport pour lequel nous observons une forte chute de rigidité en fonction du nombre de cycles appliqué. Ce phénomène se traduit également sur la forme des cycles contrainte/déformations. La figure 4 présente des cycles effort/déformations mesurés à 2,5 E06 cycles.

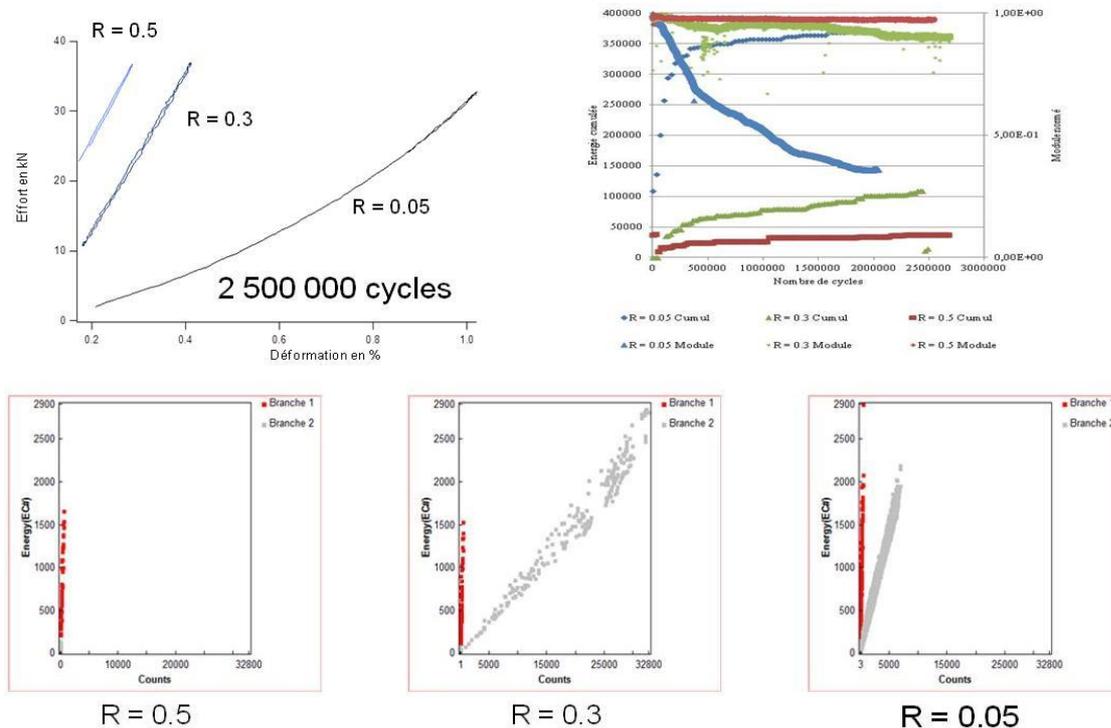


Figure 4 : Évolution de la forme des boucles effort/déformation, perte de rigidité et Energie en fonction du nombre de coups d'EA pour les trois rapports de chargements

Nous constatons que pour $R=0,5$ et $R=0,3$ la forme du cycle demeure bien droite et les essais de fatigues pour ces deux rapports ont généré une assez faible perte de rigidité. Par contre pour le rapport le plus faible, $R=0,05$, nous remarquons que la courbe présente une forme en « banane » entraînant une forte perte de raideur en bas du chargement. Cette forme apparaît pour des endommagements relativement avancés dénotant un tissage délié, et entraînant en bas de cycle des phénomènes de compression locaux sur les torons de fibres.

Un traitement des signaux acoustiques en cluster, par la méthode K-Mean, a été effectué sur les signaux à fortes amplitudes (supérieures à 70dB). Le détail du traitement est présenté en [8]. Il en ressort l'existence de deux branches (Figure 4). La branche 1 la plus énergétique correspond à l'apparition d'endommagements majeurs responsables de la perte de raideur du matériau. La seconde branche, qui n'existe que si la première branche est présente, a été attribuée à des mécanismes secondaires tels que les frottements. Néanmoins, elle est porteuse d'informations relatives à l'apparition d'endommagements en bas de cycles dans le cas des chargements à faible rapport R . Les travaux d'Henry montrent que des micro-flambements locaux se produisent lorsque l'endommagement s'installe et que les mèches sont déliées. Cela a une conséquence importante sur la durée de vie de ces matériaux.

Autre point important que cette étude a mis en lumière concerne le fait que suite à la première perte de rigidité du matériau lors de premiers cycles qui est plus induite par le niveau de chargement appliqué que le processus de fatigue, il y a stabilisation de la raideur. Cette stabilisation correspond à un type de mécanisme d'endommagement. L'évolution de ces endommagements est alors très long et la courbe rigidité/nombre de cycle présente alors un plateau. Ainsi pour un niveau de perte de rigidité donné correspond un volume d'endommagement qui a été schématisé. La figure 5 présente un exemple de l'observation obtenue. Ce type de représentation permettra d'enrichir la courbe de Wöhler en y incluant la notion de saturation d'endommagement accompagnée par une schématisation de l'endommagement. Ainsi l'idée de courbes d'iso-endommagement peut être alors proposée.

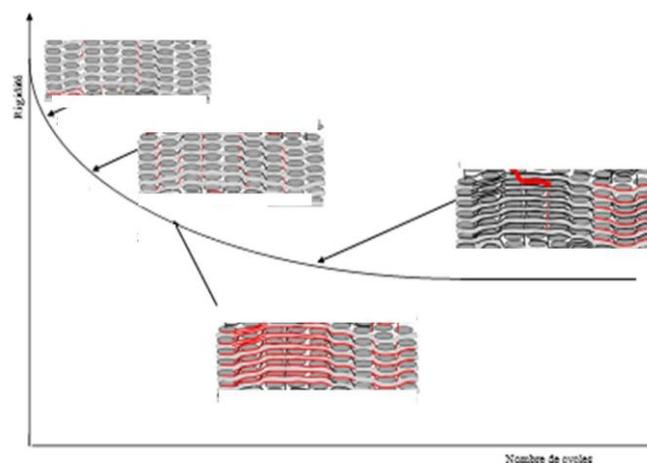


Figure 5 : Synthèse des endommagements en fonction du niveau de perte de rigidité stabilisée

4. Conclusion

L'endommagement des matériaux composites à renforts 3D, en statique mais encore plus en fatigue, reste assez peu abordé comparativement aux composites à renforts 2D classiques. Cela est

certainement dû à la relative jeunesse de ces matériaux. La complexité architecturale de ces renforts génère des mécanismes d'endommagements complexes. L'identification et le suivi de ces mécanismes nécessitent l'utilisation d'une instrumentation riche et complémentaire qui accompagne un protocole d'essai particulier et adapté aux phénomènes que l'on souhaite étudier. Ces travaux ont permis de contribuer à la compréhension des mécanismes mis en jeu lors du processus de fatigue en traction- traction uni-axiale. Les résultats de ces travaux ont permis d'alimenter et de valider des modèles numériques.

Remerciements

Remerciement à Safran Aircraft Engines pour le financement de ces travaux dans le du projet MAIA

Références

- [1]. B. Harris, « A historical review of the fatigue behavior of fibre-reinforced plastics ». Fatigue in composites, Chapter 1, pp. 3-31, 2003.
- [2]. SP. Pantelakis G. Labeas., « Constant and variable amplitude fatigue damage of laminated fibrous composites ». Failure Analysis of Industrial Composite Material, eds, E. E. Gdoutos, K. Pilakoutas, C. A. Rodopoukos, New York, pp. 247-298, 2000.
- [3]. N. K. Naik, Woven Fabric Composites, Technomic Publishing Co., Inc., Lancaster, Pennsylvania, 1994.
- [4]. K.-H. Tsai, C.-H. Chiu, T.-H. Wu, « Fatigue behavior of 3D multi-layer angle interlock woven composite plates». Composites Science and Technology, Vol. 60, pp. 241-248, 2000.
- [5]. J. Schneider, et al., « Contribution of damage mechanisms comprehension of interlock-reinforced composite material ». 13th European Conference on Composite Materials (ECCM13) Proceedings, 2008.
- [6]. C. El Hage , « Modélisation du comportement élastique endommageable de matériaux composites à renfort tridimensionnel». Roberval PhD Thesis, Université Technologique de Compiègne: Compiègne, 2006.
- [7]. S. Barré, M.L. Benzeggagh, « On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre-reinforced polypropylene ». Composites Science and Technology, Vol. 52(3), pp. 369-376, 2002.
- [8]. Joseph Henry , Zoheir Aboura¹, Kamel Khellil¹ et Stéphane Otin “Suivi de l'endommagement en fatigue d'un composite à renfort Interlock Carbone/Epoxy par Emission Acoustique » Journée Nationales des composites JNC 17 Potiers 2011