

Etude de l'endommagement et de la tenue en fatigue d'un matériau composite à matrice acrylique et fibres de verre

E. Boissin^a, T. Palin-Luc^b, C. Bois^a, J.-C. Wahl^a

a. Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France,
IUT de Bordeaux 15 rue de Naudet 33175 Gradignan, eileen.boissin@u-bordeaux.fr

b. Arts et Métiers ParisTech, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France,
Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence

Résumé

Les pales d'éolienne sont dimensionnées pour une durée de vie cible de 20 ans. Durant cette période, elles sont soumises à la fois à un grand nombre de chargements cycliques, estimé à 10^8 - 10^9 cycles, mais aussi à une grande variabilité de ces derniers. Dans le cas de pales fabriquées en composite stratifié, ces chargements cycliques peuvent provoquer une dégradation importante des propriétés mécaniques du matériau, due à l'apparition d'endommagements. Dans notre étude, le matériau considéré est un stratifié constitué d'une matrice thermoplastique acrylique et de renforts en fibres de verre. Une campagne expérimentale est menée sur ce matériau dans le but d'identifier les différents mécanismes d'endommagements se produisant sous chargements de traction quasi-statique et en fatigue pour, d'une part, les comparer à ceux observés dans des stratifiés à matrice thermodurcissable et fibres de verre et d'autre part, regarder l'influence que la température et l'humidité peut avoir sur eux, du fait de la nature de la matrice. Ces données serviront ensuite de base pour la proposition d'un modèle permettant de prévoir l'évolution des endommagements et la tenue en fatigue à grande durée de vie du stratifié, qui soit applicable au domaine éolien.

Mots clés : pales d'éolienne, durée de vie, chargements cycliques, endommagements, stratifié, thermoplastique, température, humidité, modèle, tenue en fatigue

1. Introduction

Au cours de leurs 20 ans de service, les pales d'éolienne sont soumises à un grand nombre de chargements cycliques, estimé à 10^8 - 10^9 cycles [1]. Dans le cas de pales fabriquées en composite stratifié, ces chargements cycliques peuvent provoquer une dégradation importante des propriétés mécaniques du matériau [2]–[6], due à l'apparition d'endommagements. Le but de l'étude présentée ici est d'identifier les mécanismes d'endommagements se produisant dans un stratifié à matrice thermoplastique acrylique et fibres de verre pour ensuite les comparer avec ce qui est observé pour des stratifiés thermodurcissables à fibres de verre, et de s'intéresser à la possible influence de la température et du taux d'humidité sur les mécanismes et cinétiques d'endommagements, du fait de la nature de la matrice du stratifié étudié. Dans ce papier, sont présentés les mécanismes d'endommagements communément observés dans les stratifiés, le matériau testé dans le cadre de cette étude et enfin, les méthodes de caractérisation de l'endommagement utilisées.

2. Mécanismes d'endommagements dans les stratifiés

Les composites stratifiés offrent de très bonnes propriétés mécaniques mais ces dernières peuvent se dégrader très rapidement avec l'apparition d'endommagements, et ce même pour de faibles niveaux de chargement, que ce soit en statique ou en fatigue [2]–[5]. Ces endommagements sont multiples (décohésion fibre/matrice, fissuration, délaminage, etc.), interviennent à différentes échelles et peuvent interagir entre eux (Figure 1). La rupture d'un composite n'est donc pas due à un seul mécanisme d'endommagement mais à une combinaison de ces mécanismes [6].

L'apparition et le développement des endommagements dans les stratifiés soumis à une sollicitation en fatigue ont été étudiés dans de nombreux travaux [2]–[6]. Le scénario communément observé est le suivant : dans un premier temps, on observe l'apparition de décohésions fibres/matrice, dues le plus souvent à l'existence de défauts dans les plis du stratifié, et qui peuvent ensuite coalescer en fissures. Dans un second temps, on observe la formation de fissures intralaminaires principalement dans les plis dont les orientations sont les plus éloignées de la direction de chargement. Ces fissures se propagent sur l'épaisseur des plis et lorsque les points de fissures atteignent les interfaces entre plis, des zones de délaminages peuvent apparaître. Enfin, les ruptures multiples de fibres provoquent la ruine du stratifié. Dans le cas où l'endommagement matriciel du stratifié est élevé, ces ruptures de fibres peuvent se produire pour des contraintes inférieures à la contrainte maximale mesurée en traction monotone, conduisant à une ruine prématurée du stratifié [7].

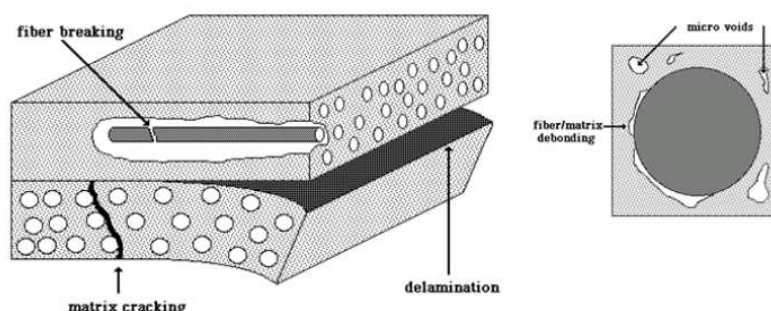


Figure 1. Différents mécanismes d'endommagements observés dans les composites stratifiés [6]

3. Matériau étudié

Le matériau étudié est un stratifié constitué d'une matrice thermoplastique acrylique Elium® et de renforts en fibres de verre E. Deux types de renforts sont considérés : des plis unidirectionnels et des plis biaxiaux (deux plis unidirectionnels superposés avec un angle de 90° entre leur orientation de fibres respectives et cousus l'un à l'autre). Pour chacun de ces renforts, l'épaisseur d'un pli, le taux volumique de fibres ainsi que le taux de porosité sont présentés dans la Table 1.

Propriétés	Plis unidirectionnels	Plis biaxiaux
Épaisseur d'un pli (μm)	600	800
Taux volumique de fibres	59-60%	46-49%
Taux de fibres	<3%	<1%

Table 1. Propriétés matériau du stratifié suivant le type de renforts utilisé

Ce matériau sert actuellement à la fabrication de prototypes de pales d'éolienne dans le cadre du projet EFFIWIND. Le choix de cette matrice thermoplastique par rapport à une matrice thermoscurcissable (époxy notamment) offre deux principaux avantages : de meilleures possibilités de recyclage, une réduction des coûts de fabrication puisque la polymérisation de l'Elium® se fait à température ambiante, et ce pour des propriétés mécaniques similaires à celles des résines époxy. Le stratifié, de même que les pales du projet EFFWIND, sont fabriquées par infusion.

Du fait de la nature de la matrice, la température et l'humidité sont des paramètres qui peuvent potentiellement influencer sur les propriétés mécaniques du stratifié ainsi que sur les mécanismes et cinétiques d'endommagements, que ce soit sous chargement quasi-statique ou de fatigue. De ce fait, une étude de l'influence de ces deux paramètres sur des plages correspondant aux plages de fonctionnement des pales d'éolienne est nécessaire. En effet, les pales en service sont soumises à des températures variant de -20°C à 60°C et peuvent se trouver en zone sèche comme en zone humide.

4. Méthodes de caractérisation de l'endommagement

Dans le but d'observer l'apparition et l'évolution des endommagements dans le stratifié sous des chargements de traction quasi-statique et en fatigue, des essais où les éprouvettes sont observées au microscope sur une zone de 30mm de long sur une de leurs tranches sont effectués (Figure 2). Pour les essais de traction quasi-statique, l'échantillon est chargé jusqu'à atteindre la déformation cible pour provoquer l'apparition et/ou l'évolution des endommagements, puis déchargé à un niveau de déformation 20% inférieur afin de permettre le scan de la zone d'observation de l'échantillon, sans risque de création de nouveaux endommagements (Figure 2). Pour les essais de fatigue, un scan de la zone d'observation de l'échantillon est effectué à chaque fois à un certain pourcentage du nombre de cycles à rupture.



Figure 2. Observation au microscope des endommagements sur la tranche d'une éprouvette [$\pm 45^\circ$] soumise à un chargement de traction quasi-statique correspondant à une déformation de 2.2%

Cette méthode d'observation a l'inconvénient de ne permettre l'observation des endommagements qu'en surface des éprouvettes, qui peuvent parfois n'être dus qu'aux effets de bords. Deux méthodes ont donc été considérées pour pouvoir accéder à l'état d'endommagement au cœur des éprouvettes : retirer une couche d'une certaine épaisseur en polissant l'éprouvette, ce qui a l'avantage d'être facile à faire mais qui entraîne la destruction partielle de l'éprouvette ; et scanner le

volume correspondant à la zone d'observation définie en utilisant la micro-tomographie, ce qui a l'avantage, de laisser l'éprouvette intacte et en conséquence de pouvoir la tester à un chargement plus élevé derrière. Par contre, cette méthode requiert un dispositif de traction in-situ permettant d'ouvrir suffisamment les endommagements pour pouvoir les observer. En effet, le scan d'un volume représentatif du composite impose une résolution de l'ordre de 5 μ m au minimum, ce qui est plus élevé que la taille des endommagements, de l'ordre d'1 μ m lorsque l'éprouvette n'est pas chargée.

Pour déterminer l'influence de la température et du taux d'humidité sur les mécanismes et cinétiques d'endommagements, les mêmes méthodes de caractérisation sont considérées mais en contrôlant la température et/ou l'humidité, l'éprouvette étant placée dans une enceinte.

5. Conclusion

La campagne expérimentale menée jusqu'à présent a permis de commencer à identifier les mécanismes d'endommagement se produisant sous chargement de traction quasi-statique, à température ambiante et pour un taux d'humidité relatif de 50%. La suite de la campagne doit permettre de continuer l'identification des mécanismes d'endommagement en traction quasi-statique et en fatigue afin de comparer ensuite avec ce qui est observé pour des stratifiés therm durcissables à fibres de verre mais aussi d'évaluer l'influence de la température et du taux d'humidité sur les mécanismes et cinétiques d'endommagements.

Les résultats obtenus grâce à cette campagne expérimentale serviront ensuite de base pour la proposition d'un modèle permettant de prévoir l'évolution des endommagements et la tenue en fatigue à grand nombre de cycles d'un stratifié, qui soit applicable au domaine éolien.

Remerciements

Les auteurs remercient la région Aquitaine, l'ADEME ainsi que les partenaires du projet EFFIWIND pour leur soutien.

Références

- [1] J. F. Mandell, R. M. Reed, D. D. Samborsky, Fatigue of fiberglass wind turbine blade materials. Sandia National Laboratories, 1992.
- [2] K. . Tserpes, P. Papanikos, G. Labeas, et S. Pantelakis, Fatigue damage accumulation and residual strength assessment of CFRP laminates, Compos. Struct., 63 (2004) 219-230
- [3] J. R. Calcaterra et S. Mall, Strength degradation during fatigue of unidirectional and cross-ply SCS-6/Ti-15-3 composites, Int. J. Fatigue, 21 (1999) 215-223
- [4] G. N. Praveen et J. N. Reddy, Transverse matrix cracks in cross-ply laminates: Stress transfer, stiffness reduction and crack opening profiles, Acta Mech., 130 (1998) 227-248
- [5] M. M. Shokrieh et L. B. Lessard, « Multiaxial fatigue behaviour of unidirectional plies based on uniaxial fatigue experiments—II. Experimental evaluation », Int. J. Fatigue, 19 (1997) 209-217
- [6] N. Revest, Comportement en fatigue de pièces épaisses en matériaux composites, Thèse, Ecole nationale supérieure des Mines de Paris, 2011
- [7] C. Hochard, S. Miot, et Y. Thollon, Fatigue of laminated composite structures with stress concentrations, Compos. Part B Eng., 65 (2014) 11-16