

Suivi par émission acoustique des mécanismes d'endommagement d'un composite aramide époxyde, après fatigue en traction et vieillissement en eau salée

Y. Menail^{1,2,*}, A. El Mahi¹, B. Redjel³ & R. Barbaoui¹

¹LAUM, UMR CNRS 6613, Université du Maine, av. O. Messiaen, 72085 Le Mans.

²LR3MI, Université Badji Mokhtar, Sidi Ammar, BP 12, Annaba. *menailyounes@yahoo.fr

³Laboratoire de Génie civil, Université d'Annaba.

Le présent article contribue à mettre en relief l'impact de la fatigue en traction et le vieillissement hydrique en eau salée sur un composite à base de fibres d'aramide taffetas et de résine époxyde sous surveillance acoustique. A cet effet, des éprouvettes en stratifiés ont été fatiguées en premier lieu selon plusieurs nombres de cycles (100 à 50000 cycles) avant d'être immergées en second lieu pendant plusieurs durées (100 à 1000h) dans de l'eau salée (37‰). Le suivi acoustique a été réalisé grâce à trois capteurs piézoélectriques qui ont été placés sur les surfaces des éprouvettes lors des essais statiques. Il nous a permis de détecter en direct les différents types d'endommagement occasionnés par la fatigue et le vieillissement (fissuration matricielle, délaminage et rupture des fibres). Les résultats obtenus qui mettent en reliefs les effets de la fatigue et du vieillissement, montrent que ces deux paramètres diminuent les caractéristiques à la rupture du matériau, progressivement en fonction de l'augmentation des nombres de cycles et de l'augmentation des durées d'immersions.

1 Introduction

Les matériaux composites à matrice polymérique ont gagné beaucoup de terrain sur les métaux, de part leurs caractéristiques très compétitives et de part leurs coûts de plus en plus abordables en fonction de la grande consommation et de la maîtrise de leur mise au point. Leurs domaines d'applications sont très vastes (aérospatiale, aéronautique, construction automobile, construction navale, secteur du pétrole, génie civil, etc.) et sont de plus en plus "innovants" et de jour en jour. Le rôle des renforts est déterminant et reste spécifique en fonction de l'usage du matériau et des caractéristiques de ces derniers. Les fibres d'aramide et de carbone, de part leurs propriétés spécifiques et de leurs coûts relativement élevés restent d'un usage réservé à des domaines bien déterminés. Quant aux fibres de verre sous ses différentes formes, elles sont les plus utilisées de part le compromis qualité prix.

Le choix du matériau (résine et fibres) en fonction du milieu d'application, de sa durée de vie et des coûts de la matière première et du mode d'obtention, a poussé les chercheurs à optimiser au maximum les performances de ces matériaux par des simulations et des recherches pratiques in situ.

En milieu marin, si les composites à base de fibres de verre sont plus au moins maîtrisés de part leur grande utilisation relative, les composites à fibres d'aramide le sont moins. Ce qui nous a poussé à contribuer par notre recherche à mieux connaître les effets de l'eau de mer sur le kevlar 171.

L'objet de cet article est de déterminer l'effet de l'eau salée sur un composite aramide époxy fatigué en traction pendant différents nombres de cycles puis immergé pendant différentes durées. La rupture des éprouvettes après fatigue et vieillissement a été suivie par émission acoustique, afin de mieux comprendre les différents phénomènes (délaminages, décohésions et rupture de matrice et de fibres) qui se passent dans le matériau durant les différents essais.

2 Matériel et méthodes

Pour notre étude, nous avons opté pour un matériau composite époxy aramide. L'élaboration des éprouvettes et le protocole expérimental ont été menés au sein du laboratoire LAUM (Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine) Le Mans, France.

Le mélange élaboré pour la réalisation de nos éprouvettes, est à base de résine époxy SR 1500 associée à un durcisseur amine SD 2505, fournis par Sicomin Composites. Les fibres aramides sont en taffetas 171.

Les plaques composites ont été élaborées par moulage au contact, sous vide, par la technique dite du "sac". La polymérisation s'est faite dans un four à 80°C pendant 6h.

Le découpage est obtenu grâce à une tronçonneuse à tête articulée avec un disque diamanté, pour donner des éprouvette de 1 mm d'épaisseur, 20mm de largeur et 200 mm de longueur.

Les essais de traction ont été réalisés sur une machine hydraulique universelle de marque INSTRON modèle 8516 équipée avec une cellule de force de 100 kN, représentée par la figure 1.



Figure 1 : Machine de traction et pilotage

Le pilotage et l'acquisition des données sont faits par ordinateur pour enregistrer l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation (figure 2). Les essais sont réalisés à température ambiante (15 à 25°C). La machine est pilotée à vitesse de traverse constante. Cette vitesse a été déterminée suite à une série d'essais préliminaires, qui a permis de la fixer à 1 mm/min pour tous les types d'échantillons. L'emploi d'une même vitesse, quel que soit le type d'essais, permet de s'affranchir de l'effet viscoélastique produit par les résines, lors de la comparaison de résultats provenant de différents essais.

Le suivi et l'acquisition des données acoustiques, se font en parallèle avec les essais mécaniques, grâce à un autre logiciel et à un autre ordinateur.



Figure 2 : Acquisition acoustique

Le protocole expérimental s'est fait de la manière suivante :

- Chargement à une vitesse constante de 1mm/mn, sous déplacement contrôlé jusqu'à 50% du déplacement à la rupture en statique.
- Fatigue avec une forme d'ondes sinusoïdales avec une fréquence de 10Hz et une amplitude de 10% du déplacement à la rupture en statique. Nous avons opté pour dix nombres de cycles de fatigue allant de 100 à 50000 cycles.
- Déchargement de l'éprouvette après fatigue.
- Vieillessement à l'eau salée pendant une durée de 100h, 500h ou 1000h, selon les cas.
- Rupture en traction avec une vitesse de déplacement de 1mm/mn.

3 Essais statiques

Les résultats des essais de traction statique sont donnés par la figure 3 et les valeurs sont portés au tableau 1.

Caractéristiques mécaniques	Kevlar taffetas 171
Masse surfacique (g/m ²)	170
Fibre (%)	42%
Module longitudinal (GPa)	16.5
Module transversal (GPa)	16.5
Contrainte à la rupture (MPa)	305
Déformation à la rupture %	2.7

Table 1 : Caractéristiques du kevlar 171

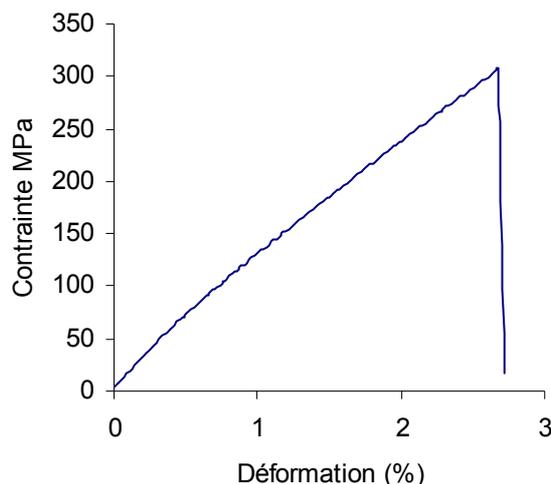


Figure 3 : Courbe contrainte/déformation du kevlar 171

La courbe, en début d'évolution et jusqu'au maximum de la contrainte est caractérisée par un comportement de type fragile du matériau, qui se manifeste par une variation quasi-linéaire de la contrainte en fonction de la déformation. Ce comportement est le résultat de la rupture progressive de la matrice, élément le plus fragile du composite, suivi de décohésions et d'éventuels délaminages. Une fois fragilisé, le matériau cède sous l'effet de l'effort, caractérisé par une chute brusque, qui implique une rupture des fibres sans pour autant arriver à la rupture totale de l'éprouvette.

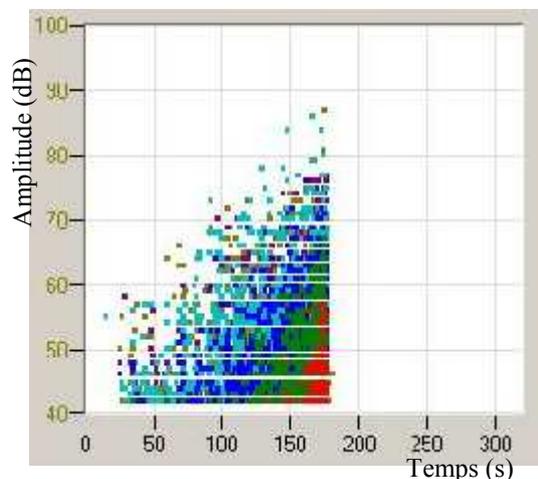


Figure 4: Suivi acoustique de l'évolution de la traction

La figure 4 représente l'évolution des événements acoustiques au cours de l'essai. Les différents mécanismes d'endommagement rencontrés dans ce matériau sont visualisés grâce à l'émission acoustique et sont principalement la fissuration de la matrice, le décollement à l'interface fibre/matrice, le délaminage interlaminaire et la rupture finale des fibres, qui conduit à la dégradation du composite. Chaque type d'endommagement est caractérisé par sa plage d'amplitudes. Il est à signaler qu'il est difficile de cerner ces différentes plages avec précision, puisque d'un côté elles se chevauchent entre elles et d'un autre côté les différents auteurs ne donnent pas les mêmes amplitudes aux mêmes endommagements.

Pour notre cas, nous pouvons dire que la fissuration de la matrice commence à partir des 25 premières secondes pour une amplitude comprise entre 40 et 60 dB. La décohésion et le délaminage apparaissent sporadiquement en début de sollicitation pour prendre de l'ampleur à partir de 100 secondes (60-70 dB). Quant à la rupture des fibres elle apparaît faiblement en même temps que le délaminage pour s'accroître vers la fin (70-85 dB).

4 Essais de fatigue en traction

Pour cerner l'effet de la fatigue sur le matériau, nous avons optés pour une série de nombres de cycles comprise entre 100 et 50 000 cycles. La figure 5 donne une idée sur l'évolution des événements acoustiques au cours de la fatigue d'un composite kevlar 171.

Le suivi acoustique est d'un apport très précieux, puisqu'il nous permet de bien visualiser les différents endommagements subit par le matériau. Pour bien comprendre l'apparition des différents types de dégradations, il faut savoir que l'éprouvette subit un chargement égal à 50% du déplacement à la rupture en statique. Puis commence une fatigue sous une fréquence de 10Hz, pour une amplitude de 10% du déplacement à la rupture.

Il est très facile de distinguer les effets des deux opérations de chargement et de fatigue. La première opération se manifeste dès le départ par une rupture de matrice suivi par un délaminage puis d'une rupture de fibres, sur un temps très court qui correspond à la charge brusque de l'éprouvette. Puis commence la fatigue qui se manifeste par une rupture de matrice, tout le long de l'opération. Le délaminage est très faible et la rupture de fibres est très rare.

Suite à ces résultats, nous pouvons dire que le matériau résiste mal aux efforts brusques et s'adapte mieux à une fatigue longue et constante.

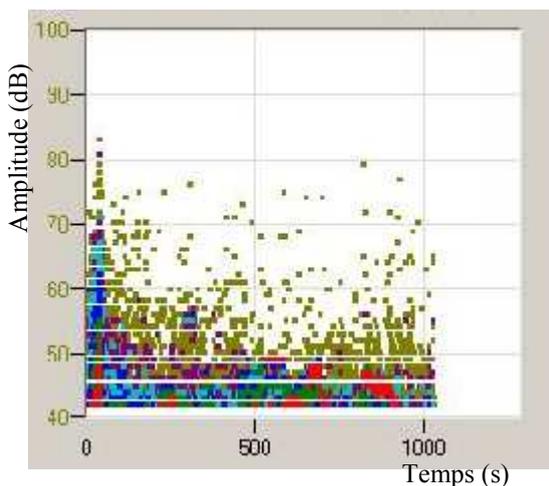


Figure 5 : Effet de la fatigue sur un kevlar 171

Comme le matériau subit deux contraintes successives, la fatigue puis le vieillissement et que leurs effets se superposent, pour les distinguer les uns des autres, nous avons mené deux séries d'essais. La première est une immersion constante (1000 h) et variation du nombre de cycles pour le suivi de la fatigue et fatigue constante (50000 cycles) avec variation des durées d'immersion pour le suivi du vieillissement.

5 Effets de la fatigue

Après différents nombres de cycles de fatigue (500, 1000, 10000 et 50000), les éprouvettes sont immergées dans de l'eau salée pendant 1000h, pour subir le même vieillissement hydrique. Suite à quoi, elles subissent une traction statique jusqu'à rupture. Les résultats obtenus, portés sur la figure 6 sont comparés entre-eux pour mettre en relief l'effet de la fatigue sur le composite aramide. Ils montrent que le comportement du matériau est le même que pour le cas de l'essai statique de caractérisation du matériau de la figure 3. Il est de type fragile pour la série d'éprouvettes testées. D'abord une variation quasi-linéaire de la contrainte en fonction de la déformation, ensuite une chute brutale de cette dernière. Cette chute est due à la rupture des fibres, entraînant la rupture totale de l'éprouvette. Nous observons que, les valeurs maximales de la contrainte et de la déformation correspondante diminuent lorsque le nombre de cycles de fatigue augmente, sauf pour la courbe de 1000 cycles qui se superpose sur celle des 500. Nous pouvons déduire que l'effet de la fatigue est le même pour la plage 500-1000 cycles.

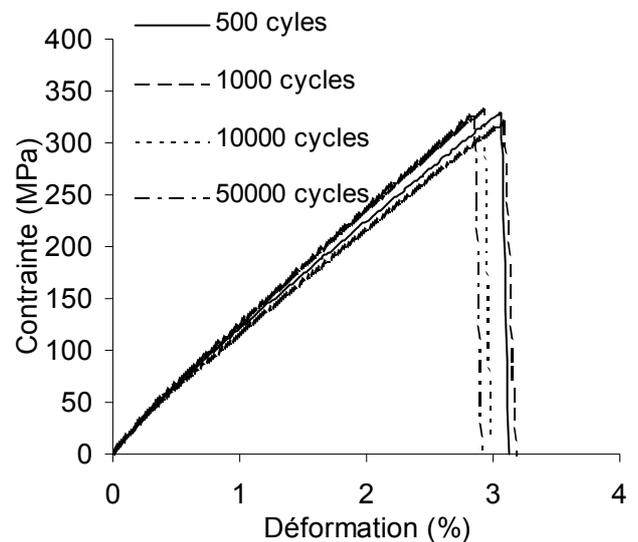


Figure 6 :Rupture après fatigue et 1000 heures d'immersion

6 Effets du vieillissement

Après fatigue à différents nombres de cycles, nous avons immergé les éprouvettes dans l'eau salée pendant trois durées différentes, afin de leur faire subir différents niveaux de vieillissement. Ensuite, elles ont été testées en traction statique. La figure 7 donne les résultats d'essais statiques après fatigue à 50000 cycles et pour les trois durées de vieillissement (100, 500 et 1000h). Cette figure représente l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation. L'analyse de ces résultats montre que le comportement reste quasi-linéaire jusqu'à la rupture de l'éprouvette qui est de type fragile. La contrainte et le déplacement à la rupture diminuent faiblement lorsque la durée d'immersion augmente, sauf pour les 500h. Ce qui démontre que les durées d'immersion doivent être augmentées, pour que le suivi soit plus représentatif.

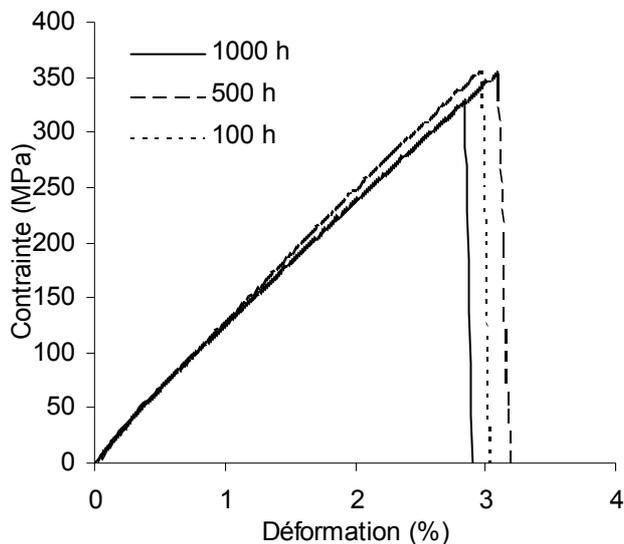


Figure 7 : Rupture après 50 000 cycles de fatigue et vieillissement

7 Double effets fatigue et vieillissement

Les effets de la fatigue et du vieillissement sont conjugués et sont donnés par la figure 8. Cette figure représente un essai statique après une fatigue de 1000 cycles suivi d'une immersion en eau salée pendant 100 heures d'un kevlar 171. Comparativement à la figure 4, qui représente un essai statique sans fatigue ni vieillissement, les résultats de la figure 8, montrent qu'il y a une richesse en événements, révélateurs d'un changement du comportement de l'éprouvette face au même essai. Le matériau est fragilisé, puisqu'il commence à se dégrader dès les premières secondes de l'essai, alors que l'éprouvette de la figure 4, ne commence à se dégrader qu'à partir de la 25^{ème} seconde. Il y a aussi apparition de rupture de matrice et de délaminage brusques, dus sûrement aux effets du vieillissement.

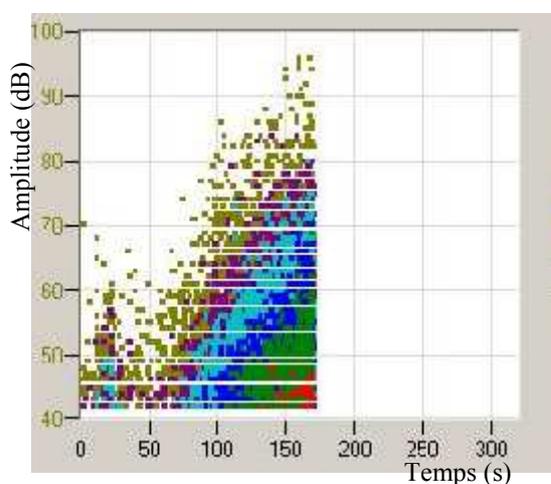


Figure 8 : Rupture après 1000 cycles de fatigue et 100 h d'immersion

A partir des 50 premières secondes, les différentes dégradations commencent à apparaître progressivement d'une manière intensive. De la 50^{ème} à 100^{ème} seconde, nous avons une rupture de matrice et un délaminage plus au moins diffus. De la 100^{ème} jusqu'à la fin, nous avons rupture de matrice et délaminage plus intensifs avec apparition de rupture de fibres.

8 Conclusion

Malgré que l'objectif de ce travail est plus au moins atteint, il nous a ouvert beaucoup de perspectives, qui, si nous nous pouvons les prospecter, nous permettent d'enrichir nos résultats et de mieux assimiler les différents phénomènes rencontrés lors de cette étude.

Les résultats des essais de traction en statique et en fatigue sur un matériau composite aramide époxy-amine en milieu humique sont probants dans la plupart des cas.

La connaissance et la prédiction du comportement de ces matériaux composites, nécessitent des études plus approfondis, étant donné qu'ils dépendent de plusieurs paramètres, en l'occurrence, la technique de mise en œuvre, les essais proprement dits, les moyens d'investigations, etc.

Les résultats obtenus nous ont permis de constater que la fatigue influe considérablement sur les caractéristiques mécaniques du matériau, et plus le nombre de cycles de fatigue est important et plus la charge maximale que peut supporter le matériau diminue.

De même pour l'effet du vieillissement, les résultats obtenus ont permis de montrer que l'absorption de l'eau salée par le composite influe négativement sur son comportement mécanique. La charge maximale que le matériau peut supporter diminue lorsque la durée d'immersion augmente.

Et de se fait nous pouvons dire que la conjugaison des deux contraintes ne fait qu'affaiblir le matériau, ce qui a été révélé par le suivi acoustique. L'apparition des différentes dégradations, rupture de matrice, délaminage et rupture de fibres en phase finale, en fonction de la fatigue et du vieillissement est révélatrice du comportement de ce matériau et de ses caractéristiques.

Remerciements

Il m'est agréable de profiter de cette occasion pour remercier le directeur du laboratoire LAUM de l'université du Maine, pour m'avoir accueilli dans sa structure, et d'exprimer ma gratitude au chef d'équipe "matériaux composites" pour m'avoir orienté et avoir tout fait pour que ce travail aboutisse, et donne un fruit.

Je ne peux terminer sans remercier aussi, toute l'équipe d'acoustique avec laquelle je me suis initié à la manipulation de cet formidable outil de CND.

A tous merci!

Références

- [1] Adda-bedia E.A., Bouazza M., Tounsi A., Benzair A. et Maachou M., "Prediction of stiffness degradation in hygrothermal aged [m/90n]S composite laminates with transverse cracking". *Elsevier. Journal of materials processing technology* (2007).
- [2] Bentahar M., "Acoustique non-linéaire : Application à la caractérisation ultrasonore de l'endommagement des matériaux hétérogènes et à la prédiction de la durée de vie". Thèse de L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. (2005).
- [3] Berreur L., De Maillard B., Nösperger S., "L'industrie française des matériaux composites", *Nodal Consultants*, (2001).
- [4] El Mahi A., Bezazi A. & Berthelot J.-M., "Flexural and Fatigue Behaviour of Cross-Ply Laminates". *International Conference on Composites Engineering (ICCE 9), San Diego, USA, 1-6 Juillet* (2002).
- [5] El Mahi A., M. Hamoudi, M. Assarar, Y. Menail & R. El Guerjouma., "Vieillessement hydrique des composites stratifiés: évaluation par émission acoustique des mécanismes d'endommagement". *Fifth International Congress Materials Sciences and Engineering, Guelma, Algérie, 22-24 novembre* (2008).
- [6] Huguet S., "Application de classificateurs aux données d'émission acoustique : identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polymère", Thèse à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (2002).
- [7] Kotsikos G., Evans J. T., Gibson A. G. et Hale J., "Environmentally enhanced fatigue damage in glass fiber reinforced composites characterised by acoustic emission". *Composites : Part A*, vol. 31, pp.969-977. (2000).
- [8] Menail Y., A. El Mahi, M. Assarar, B. Redjel, A. Kondratas "Effet du vieillissement à l'eau douce sur le comportement mécanique des matériaux composites à base de fibres de verre et de kevlar et à matrice époxyde" *Mechanika*, Nr.2(76) pp. 28-32. (2009).
- [9] Mercier J., "Prise en compte de vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement des structures en matériaux composites". Thèse École des mines de Paris. (2006).
- [10] Nechad H., "Evaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : Estimation de la durée de vie restante", Thèse à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (2004)
- [11] Olexander Y., Mykola O., Serhiyenko M., Valentyn R. et Skalsky R., "Analysis of acoustic emission caused by internal cracks". *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 68, Issue 11, p. 1317-1333. (2001).
- [12] Roget J., "Essais non destructifs: l'émission acoustique, mise en œuvre et application". CETIM, 196 p. (1988).
- [13] Scruby, C. B., "Quantitative Acoustic Emission Techniques". *Nondestructive Testing*, Vol. 8. pp. 141-210. (1985).
- [14] Swindlehurst W. E. et Engel C., "A model for acoustic emission generation in composite materials". *Composites Science and Technology*, Volume 11, Issue 6, p. 463-479. (1978).
- [15] Talreja R., "Fatigue of composite materials: damage mechanisms and fatigue-life Diagrams". *Proceedings of Royal Society London*, A378, pp 461-475. (1981).
- [16] Uenoya T., "Acoustic emission analysis on interfacial fracture of laminated fabric polymer matrix composites". *Journal of Acoustic Emission*, vol.13, n°3/4, pp.S95S102. (1995).