

# Evolution de la rupture des fibres en fatigue dans un composite unidirectionnel à fibres longues

**F. Pagano<sup>1a</sup>, M. Kaminski<sup>1b</sup>, A. Thionnet<sup>2</sup>**

1. ONERA The French Aerospace Lab, 29 avenue de la division Leclerc, 92320 Châtillon

a. fabrizio.pagano@onera.fr

b. myriam.kaminski@onera.fr

2. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Centre des Matériaux P.M. Fourt, UMR CNRS 7633, BP 87, 91003 Evry - alain.thionnet@mines-paristech.fr

## Résumé

*Dans un composite stratifié multidirectionnel, la charge est principalement supportée par les plis qui sont sollicités dans le sens des fibres. Dans la direction des fibres, la rupture est essentiellement guidée par le comportement des fibres qui assurent l'essentiel des propriétés de rigidité et résistance. La rupture des fibres en fatigue est étudiée au travers d'une campagne expérimentale multi instrumentée (émission acoustique, thermographie IR, etc.) sur un composite unidirectionnel sollicité dans la direction des fibres. Le but est de déterminer la loi d'évolution de rupture des fibres en fatigue qui servira à nourrir le modèle de prévision de la durée de vie développé pour les composites stratifiés d'unidirectionnels à fibres longues.*

**Mots clés :** fatigue ; composite unidirectionnel ; ruptures de fibres ; émissions acoustiques.

## 1. Introduction

En raison de leurs caractéristiques spécifiques élevées, les matériaux composites, et tout particulièrement les stratifiés d'unidirectionnels, sont de plus en plus largement employés pour la réalisation de structures primaires, telles que le caisson central, les ailes ou le fuselage des avions. Contrairement aux idées reçues, les matériaux composites sont sensibles à la fatigue, en particulier pour les niveaux d'effort élevés envisagés actuellement. Afin d'optimiser les performances des pièces aéronautiques, les structures composites sont en effet soumises à des chargements de plus en plus sévères, réduisant ainsi les marges de dimensionnement sous chargement statique et pouvant induire une réduction importante de la durée de vie sous chargements répétés.

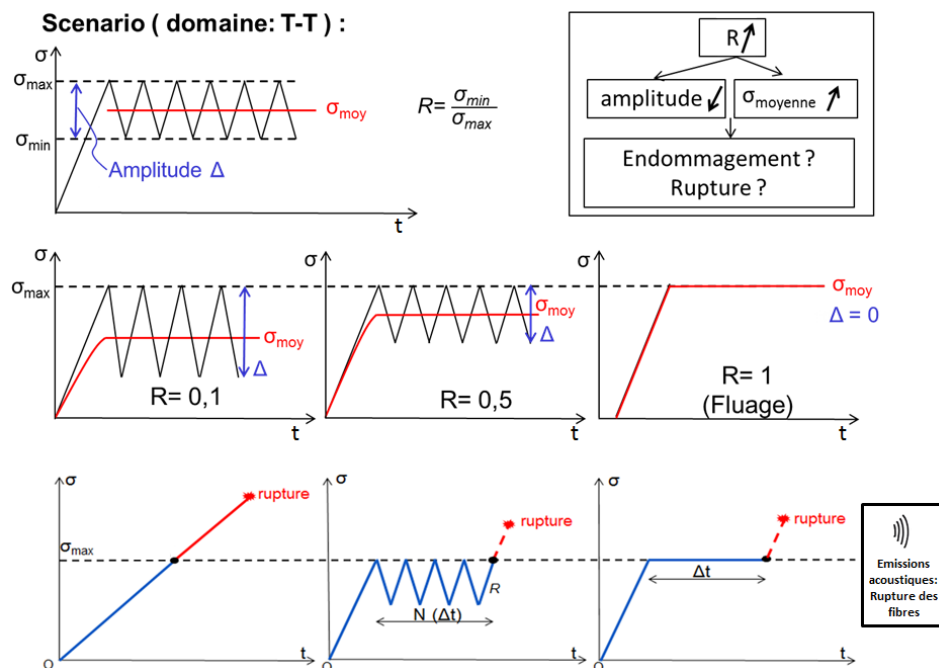
L'objectif de ce travail de thèse est de développer une approche pour la prévision de la durée de vie et des performances résiduelles des structures s'appuyant sur les modèles d'endommagement statique ([1], [2]) complétés par des lois d'évolution des dommages en cycles [3] ou des lois de type incrémental [4]. Le matériau retenu dans cette étude est le composite stratifié T700GC/M21 à fibres longues de carbone et avec une matrice polymère thermodurcissable. Une attention particulière est portée dans cette étude sur les unidirectionnels  $[0^\circ]_n$ . En effet, il est reconnu depuis longtemps que le phénomène de fatigue y est inopérant : on estime que les fibres de carbone "ne fatiguent pas". Si cette affirmation est effectivement vraie [5], en réalité (i) la dispersion aléatoire dans les contraintes à rupture des fibres et (ii) le caractère visqueux de la matrice du composite, jouent un rôle fondamental sur la cinétique du phénomène de rupture des fibres et par conséquent, sur la rupture du matériau [6]. Ce point est étudié au travers d'une campagne expérimentale sur des unidirectionnels sollicités en traction uniaxiale longitudinale, avec des lois horaires de sollicitations bien spécifiques. L'objectif est d'identifier des lois d'évolution de rupture des fibres en fatigue au sein du composite stratifié. Les lois identifiées serviront à nourrir le modèle de prévision de durée de vie.

## 2. Fatigue d'un stratifié UD $[0^\circ]_n$ sollicité dans le sens des fibres

### 2.1 Définition de la campagne d'essais

La campagne d'essai est structurée au travers d'une « comparaison » entre essais (i) de traction monotone, (ii) de fatigue à différents rapports de charge et nombre de cycles et (iii) de fluage à différents temps de maintien (*Figure 1*). Ceci constitue un point original de l'étude.

On reste dans le domaine de la traction (c.à.d.  $0 < R \leq 1$ ). Les ruptures de fibres seront identifiées au moyen de la technique d'émission acoustique (EA). Il s'agira de comprendre le scénario le plus endommageant pour le matériau, à même contrainte maximale imposée. Dans un cas, la contrainte moyenne qui augmente pour des rapports de charge croissants peut engendrer un nombre de ruptures prématurées de fibres plus grand, et donc une surcharge plus importante sur les fibres voisines. Dans l'autre cas, l'augmentation de l'amplitude du cycle de fatigue pour des rapports de charge décroissants peut exacerber la fissuration et les effets du frottement. Le rôle de la relaxation par la viscosité et la dégradation de la matrice sont importants dans les deux cas. On est alors confronté à deux tendances opposées et il faudra identifier la configuration de chargement la plus endommageante et critique pour le matériau. Ce point est très peu abordé dans la littérature. L'utilisation de l'émission acoustique nous aidera à proposer une loi d'évolution de la rupture des fibres pour le modèle de prévision de la durée de vie.



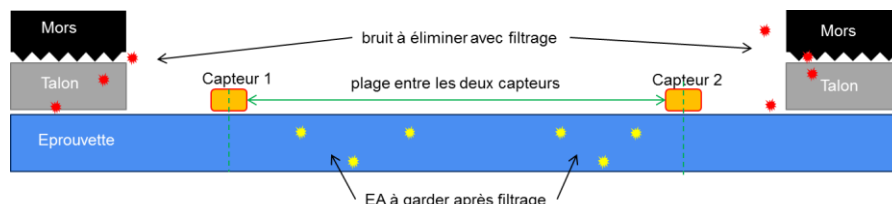
**Figure 1** – Campagne expérimentale envisagée sur le stratifié UD  $[0^\circ]_n$  sollicité dans le sens des fibres.

Des premiers essais de traction sur du  $[0^\circ]_n$  ont été réalisés. Ces essais sur des stratifiés unidirectionnels à fibres longues sollicités dans la direction des fibres sont extrêmement difficiles à réaliser, cela peut expliquer le peu d'informations relatives à ce type d'essais dans la littérature. En effet, des fissures parallèles aux fibres dans les plis à  $0^\circ$  (splitting) peuvent amorcer dans les zones à gradient (la zone de serrage des mors par exemple). C'est pourquoi, avant de réaliser ces premiers essais, une étude préliminaire a été menée pour déterminer la configuration d'essai la plus adéquate. Celle-ci a permis d'optimiser (i) la configuration de serrage et (ii) la forme et le type de talons (aluminium ou composite fibres de verre) à utiliser pour minimiser les contraintes parasites

dans la zone de serrage de l'éprouvette afin de s'affranchir des problèmes de rupture prématurée de l'éprouvette dans les mors. Cette étude d'optimisation a été faite au travers de simulations aux éléments finis et d'essais en laboratoire.

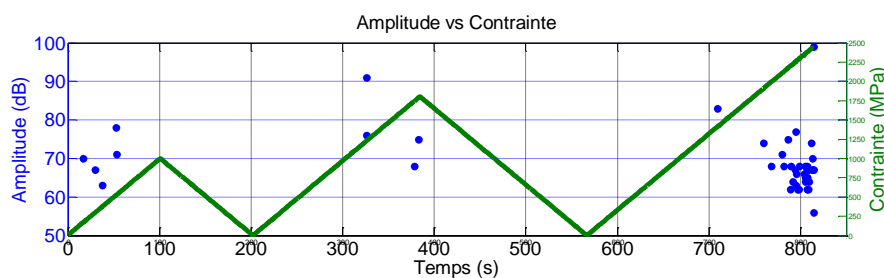
## 2.2 Multi-instrumentation

La technique des EA est largement exploitée dans la littérature comme moyen de suivi et d'identification des mécanismes d'endommagement ([7]). Cependant, l'interprétation des données est difficile. Dans l'optique de réaliser une analyse fine des résultats des EA pour l'identification des ruptures de fibres, une démarche en deux étapes a été suivie. Premièrement, la localisation des événements acoustiques a été réalisée afin de ne garder que les événements provenant de la plage entre les deux capteurs (*Figure 2*) en considérant la vitesse de propagation des ondes à l'état initial. Deuxièmement, l'utilisation des algorithmes de classification des données acoustiques nous a permis d'identifier la classe d'EA correspondant aux ruptures de fibres, et de la séparer de tout le reste (c.à.d. bruit, fissuration matricielle, splitting, décohésion).



**Figure 2** – Schéma représentatif de la technique des Emissions Acoustiques ; filtrage par localisation.

La *Figure 3* montre les EA retenus après filtrage par localisation pendant un essai de charge-décharge. On observe un effet Kaiser jusqu'à 700 s. Cela se traduit, lors d'une nouvelle montée en charge, par une activité nulle tant que la contrainte appliquée ne dépasse pas la valeur maximale précédemment atteinte. L'activité acoustique est plus intense juste avant la rupture de l'éprouvette, l'effet Kaiser n'est plus vérifié.



**Figure 3** – EA retenus pendant un essai de charge-décharge.

On trouve dans la littérature des informations contradictoires sur la classification de l'endommagement [8]. La vitesse élevée de propagation des EA dans un UD et les petites dimensions des éprouvettes rendent la localisation délicate. Nous avons alors utilisé une instrumentation complémentaire, synchronisée aux EA, pour comparer les différents types de données, et mieux identifier l'endommagement et nous permettre de comprendre le déroulement de l'essai. La corrélation d'images numériques (CIN) nous a permis de vérifier le bon alignement initial de l'éprouvette (afin de minimiser la rupture prématurée par splitting), et de suivre ce qu'il se passe au niveau des talons (détachement/ endommagement) comme présenté sur la *Figure 4*.

La thermographie passive infrarouge doit être analysée plus en détails. Elle devrait nous permettre d'identifier un éventuel échauffement dû à un cluster des fibres rompues par exemple.

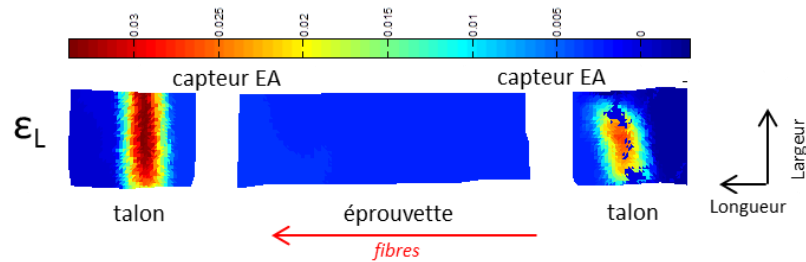


Figure 4 – Champ de déformation longitudinale sur l'éprouvette obtenu par CIN.

### 3. Conclusion et Perspectives

Des premiers essais statiques sur UD [0°] ont été réalisés afin de mettre en place la procédure expérimentale qui nous permettra de suivre l'évolution des ruptures des fibres dans les plis à 0° au sein d'un composite stratifié. Pour cela, une optimisation de la configuration de l'essai et une réflexion sur la matrice d'essai ont été effectuées pour préparer au mieux la campagne d'essais en fatigue. Le concept de la multi-instrumentation est un point clé pour acquérir une compréhension fine des résultats au travers d'une comparaison entre les différents moyens de mesure.

En parallèle de ces travaux expérimentaux, des simulations aux éléments finis sur un VER composé de plusieurs fibres noyées dans une matrice viscoplastique sont en cours. Les chargements appliqués correspondent à la matrice d'essai définie pour la campagne expérimentale. L'objectif est d'obtenir des informations à l'échelle des constituants pour comprendre l'ensemble des micro-mécanismes qui pilotent l'endommagement et la rupture à fatigue dans les plis unidirectionnels (Figure 5).

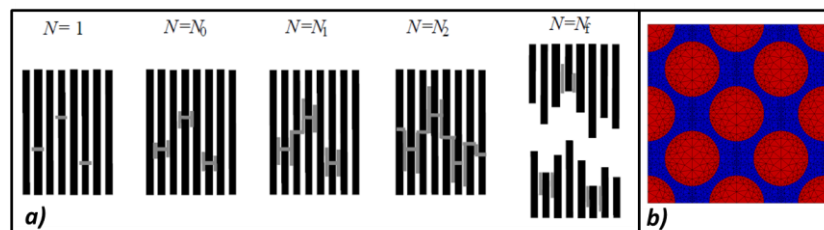


Figure 5 – a) Schéma de progression de l'endommagement et rupture des fibres dans un composite unidirectionnel sollicité dans la direction des fibres [9]. b) Maillage FEM d'un VER pour la simulation des phénomènes évoqués dans a).

### Références

- [1] Huchette C. « Analyse multiéchelle des interactions entre fissurations intralaminaires et interlaminaires dans les matériaux composites stratifiés ». Thèse de doctorat de l'Université de Paris VI, 2005.
- [2] Laurin F. « Approche multiéchelle des mécanismes de ruine progressive des matériaux stratifiés et analyse de la tenue de structures composites ». Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, 2005.
- [3] Revest N. « Comportement en fatigue de pièces épaisses en matériaux composites ». Thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2011.
- [4] Angrand L. « Modèle d'endommagement incrémental en temps pour la prévision de la durée de vie des composites tissés 3D en fatigue cyclique et en fatigue aléatoire ». Thèse de doctorat de l'École Normale Supérieure, 2016.
- [5] Bunsell A.R., Somer A. « The tensile and fatigue behavior of carbon fibres ». *Plastics, rubber and composites, processing and applications*, Vol 18, No. 4, 1992.
- [6] Meziere Y., Bunsell A.R., Favry Y., Teissedre J.-C., Do A.T. « Large strain cyclic fatigue testing of unidirectional carbon fibre reinforced epoxy resin ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 36, Issue 12, December 2005, Pages 1627–1636.
- [7] Chou H.-Y. « Damage Analysis of Composite Pressure Vessels Using Acoustic Emission Monitoring ». Thesis of RMIT University, Australia, 2011.
- [8] Cuatrecasas V.-A.-M. « Identification des mécanismes d'endommagement de stratifiés carbone-époxyde par couplage de l'émission acoustique et de la thermographie infrarouge ». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2015.
- [9] Gamstedt E.K., Andersen S.I., « Fatigue Degradation and Failure of Rotating Composite Structures ». Risø National Laboratory, 2001.