



HAL
open science

Analyse de l'endommagement matriciel de CFRP sous chargements mécaniques croissant, cyclique et constant

Christian Hochard

► To cite this version:

Christian Hochard. Analyse de l'endommagement matriciel de CFRP sous chargements mécaniques croissant, cyclique et constant. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01621550

HAL Id: hal-01621550

<https://hal.science/hal-01621550>

Submitted on 23 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse de l'endommagement matriciel de CFRP sous chargements mécaniques croissant, cyclique et constant

Matrix damage analysis on CFRP under monotonic, cyclic and constant mechanical loads

Ch. Hochard¹, A. Girardot^{1,2}, N. Lahellec¹, and S. Leroch²

1 : Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, LMA, Marseille, France
e-mail : eyer@lma.cnrs-mrs.fr & hochard@lma.cnrs-mrs.fr

2 : CEA, DEN, Département de Technologie du Cycle du combustible,
BP 17171, F-30207 Bagnols sur Cèze, France, sandrine.leroch@cea.fr

Résumé

L'endommagement matriciel, initié par des décohésions fibres/matrice, des fissurations matricielles et finalement des fissures transverses parallèles aux fibres, se développe sous l'action de chargements mécaniques de différentes natures. Ces chargements peuvent correspondre à des chargements monotones croissants et des chargements cycliques (fatigue cyclique) mais également des chargements constants (fatigue statique). Même si ce dernier type de chargement est moins étudié, il doit être pris en compte pour certaines applications (réservoirs sous pression, í). L'objectif de ce travail qualitatif est d'étudier expérimentalement l'influence de ces chargements sur l'évolution de l'endommagement matricielle. Le matériau étudié est un tissu déséquilibré verre/epoxy adapté à la mesure de l'endommagement transverse. Un composite unidirectionnel carbone/epoxy avec des essais de type [+θ, -θ], adaptés à ce type de mesure a également été étudié. Des résultats d'essais sont présentés ainsi qu'une analyse sur les types de modèle pour décrire l'évolution de cet endommagement.

Abstract

The matrix damage, initiated by fiber / matrix decohesion, matrix cracking and finally transverse cracks parallel to the fibers develops under the action of mechanical loadings of different natures. These loads can correspond to increasing monotonic loads (static) and cyclic loads (cyclic fatigue) but also constant loadings (static fatigue). Even if the latter type of loading is less studied, it must be taken into account for certain applications (pressure tanks, ...). The objective of this work is to study experimentally the influence of these loads on the evolution of the matrix damage. The material studied is an unbalanced glass/epoxy woven fabric suitable for the measurement of transverse damage. A unidirectional carbon/epoxy composite with tests of type [+θ, -θ], also suitable for this type of measurement has been studied too. Test results are presented as well as an analysis on model types to describe the evolution of this damage.

Mots Clés : endommagement transverse, matrice, fatigue statique

Keywords : Transverse damage, matrix, static fatigue

1. Introduction

L'endommagement matriciel, initié par des décohésions fibres/matrice, des fissurations matricielles et finalement des fissures transverses parallèles aux fibres se développe sous l'action de chargements mécaniques de différentes natures [1,2,3]. Ces chargements peuvent correspondre à des chargements monotones croissants et des chargements cycliques (fatigue cyclique) mais également des chargements constants (fatigue statique). Même si ce dernier type de chargement est moins étudié, il doit être pris en compte pour certaines applications (réservoirs sous pression, í). L'objectif de ce travail qualitatif est d'étudier expérimentalement l'influence de ces chargements sur l'évolution de l'endommagement matriciel. Le matériau étudié est un tissu déséquilibré verre/epoxy adapté à la mesure de l'endommagement transverse. Il s'agit d'un déséquilibré 83% sens chaîne et 17% sens trame en volume. Les fibres sens trame contiennent les fissures transverses qui se développent dans les mèches sens chaîne et le faible volume permet une mesure aisée de l'endommagement transverse.

Un second matériau unidirectionnel carbone/epoxy a été étudié également [4]. Des essais de type $[+\theta, -\theta]_s$ adaptés à ce type de mesure ont été proposés. Des résultats d'essais sont présentés ainsi qu'une analyse sur les types de modèles pour décrire l'évolution de cet endommagement.

2. Comportement tissé déséquilibré verre/epoxy

2.1 Présentation du matériau et comportement en statique

La Fig. 1 représente le matériau étudié. Il s'agit d'un tissé verre/epoxy déséquilibré satin 4 avec un pourcentage de fibre de 83% dans le sens chaîne et de 17% dans le sens trame. Dans le cas d'un chargement suivant la direction transverse (ou sens trame), les fils sens trame limitent la propagation des fissures transverses dans les fils sens chaîne et permettent un développement continue de ces fissures, contrairement au cas de plis unidirectionnels pour lesquels l'échantillon rompt dès l'apparition de la première rupture transverse. D'autre part, le verre a un allongement à rupture très élevé. Pour ces raisons, les niveaux d'endommagement transverse atteints peuvent être très élevés.

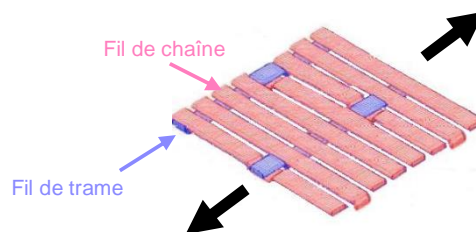


Fig. 1. Tissé verre/epoxy déséquilibré 83/17.

Ce matériau est adapté à l'analyse de l'évolution de cette densité de fissure transverse qui se traduit par une baisse de rigidité comme on peut le voir sur la figure 2. Dans le cas de ces fissures qui s'ouvrent suivant la direction transverse, l'hystérésis est faible comparée à celle observée en cisaillement (sur un $[+45, -45]_s$ par exemple) causée par le frottement sur les lèvres des fissures.

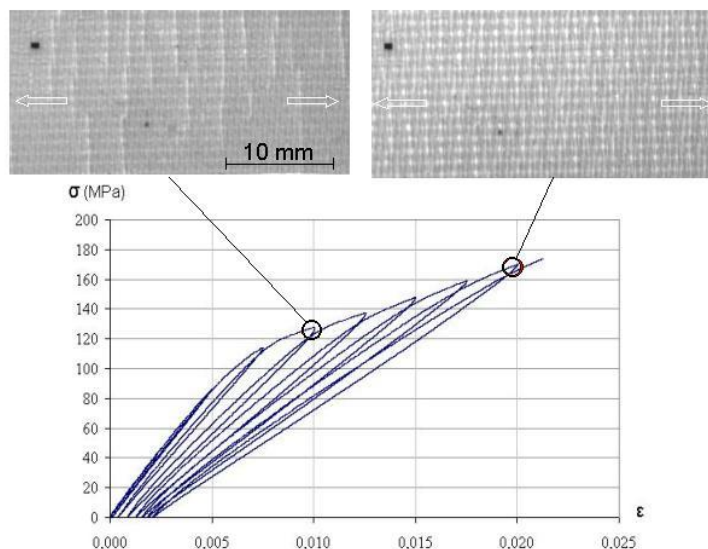


Fig. 2. Evolution de l'endommagement matricielle et baisse de rigidité

2.2 Comportement en fatigue cyclique

La Fig. 3 représente le cas d'un chargement cyclique (fatigue cyclique) pour lequel il est possible d'observer l'évolution de l'endommagement (baisse du module de rigidité) au cours des cycles. Ce comportement a largement été étudié dans la thèse de Y. Thollon [2,3]. Un modèle d'endommagement cumulé a été proposé pour lequel l'endommagement total est égal à l'endommagement statique (1^{er} cycle en fatigue) plus l'endommagement de fatigue qui évolue au cours des cycles. Cette évolution dépend du niveau d'endommagement, des niveaux de chargement (transverse et de cisaillement) ainsi que de l'amplitude (différence entre contraintes max et min). Un seuil est également introduit dans la loi d'évolution. Cette loi a été identifiée et validée pour différentes orientations.

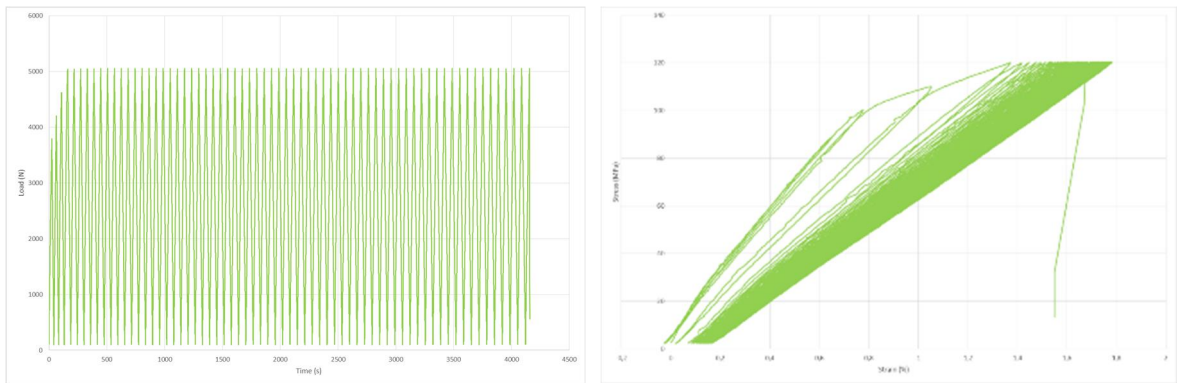


Fig. 3. Evolution de l'endommagement en fatigue cyclique

2.3 Comportement en fatigue statique

La question posée dans ce travail est « comment évolue l'endommagement pour un chargement constant ». La Fig. 4 représente cette même évolution mesurée après une mise sous charge et un maintien de la charge (fatigue statique) durant des périodes de plus en plus longues. On peut également observer une évolution de l'endommagement après ces périodes de maintien de la charge.

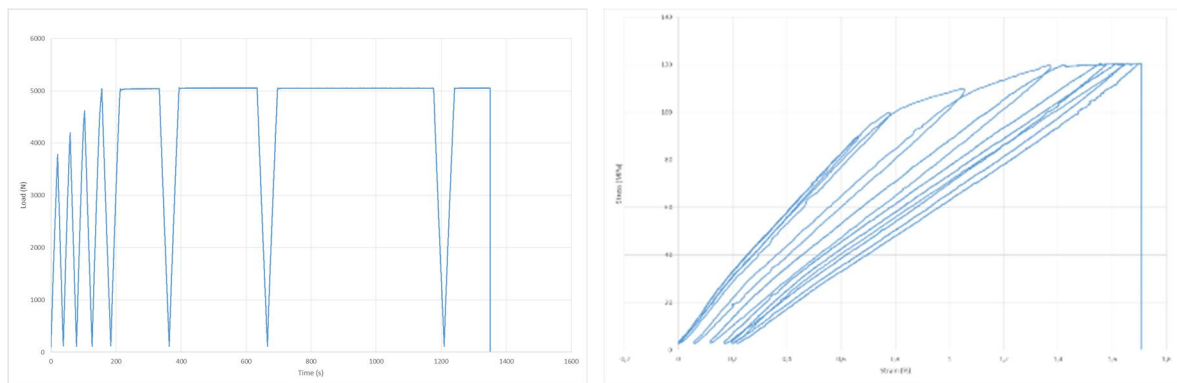


Fig. 4. Evolution de l'endommagement en fatigue statique

Cette propagation est probablement associée à des mécanismes micro de propagation de fissures dans la matrice (fluage, redistribution des contraintes, $\dot{\epsilon}$) et aux interfaces fibre/matrice. Une modélisation à cette échelle, propagation de fissures multiples dans des matériaux hétérogènes avec des comportements non linéaires, est très complexe et difficilement exploitable pour des stratifiés

quelconques et des structures. Pour une exploitation possible dans un cadre industriel, nous travaillons sur une modélisation à l'échelle des plis.

3. Evolution de l'endommagement pour les différents chargements

Les évolutions des endommagements pour les différents types de chargement ont été étudiées en fonction des niveaux de chargement.

3.1 Evolution de l'endommagement en statique

L'évolution de l'endommagement pour un chargement statique peut être observée par un essai avec des charges et décharges en augmentant progressivement les contraintes (Fig. 2). Cet endommagement dépend du niveau de contrainte et du niveau d'endommagement. Ce type de chargement a été largement étudié et des lois d'évolution ont été proposées avec par exemple un endommagement proportionnel à la déformation élastique [1,2] dans la direction transverse.

3.2 Evolution de l'endommagement en fatigue cyclique

Les évolutions des endommagements pour des chargements de fatigue cyclique ont été étudiées pour différents matériaux [3,5]. Dans le cas du déséquilibré 83/17 verre/epoxy en traction transverse, le comportement jusqu'à rupture a été étudié pour différents niveaux de chargement (Fig. 3). Ce comportement dépend du niveau du chargement σ_{max} et, à moindre mesure pour des chargements transverses, de l'amplitude ($R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$). L'endommagement augmente plus rapidement pour R diminuant. Ce phénomène est beaucoup plus important en cisaillement [3]. Dans ce cas, pour $R = -1$ (essais sur tubes en torsion) par exemple, l'endommagement évolue très rapidement.

Notons également une influence importante de la fréquence Fig. 3. Dans ce cas, si la fréquence diminue, le nombre de cycle jusqu'à rupture diminue également. Si la fréquence diminue, le temps de l'essai augmente et donc le matériau est sollicité pendant une période plus longue. Nous allons voir dans la partie suivante qu'effectivement le temps est un paramètre important dans l'évolution de l'endommagement.

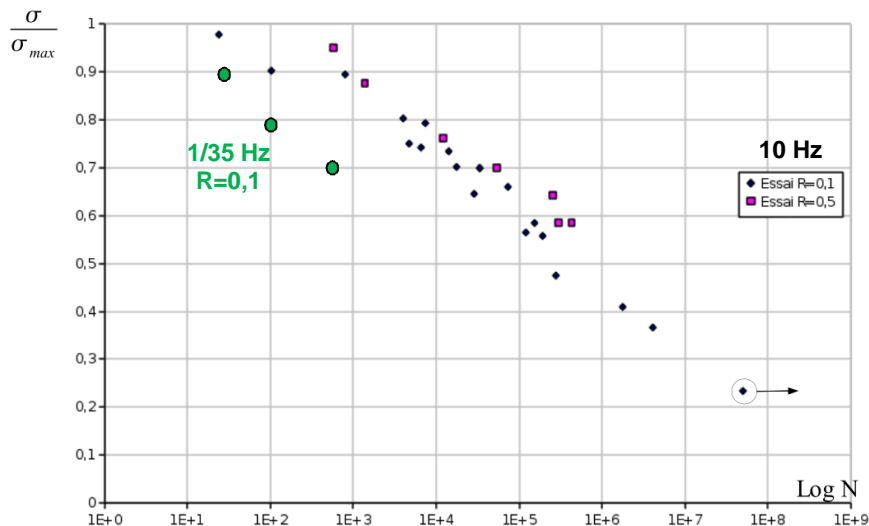


Fig. 5. Evolution de l'endommagement en fatigue

3.3 Evolution de l'endommagement en fatigue statique

Comme nous l'avons observé Fig. 4, l'endommagement continue d'augmenter pour un chargement constant (fatigue statique). Il est possible de tracer sur une même courbe l'effort à rupture en fonction du temps pour des chargements de fatigue cyclique et statique (Fig. 6). Si le temps jusqu'à rupture est plus court en fatigue statique qu'en fatigue cyclique (à 1/35 Hz, donc très lent) pour des niveaux d'effort très élevés, le temps devient beaucoup plus long en fatigue statique pour des chargements plus faibles.

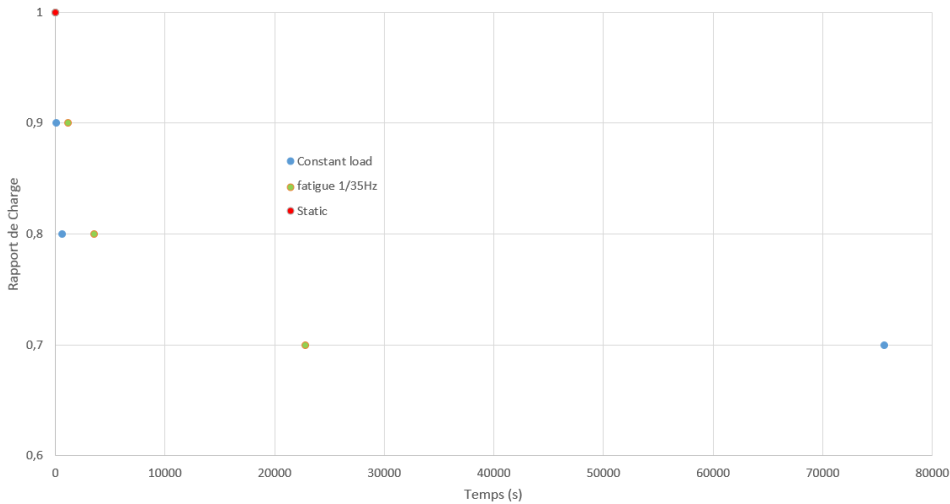


Fig. 6. Evolution de l'endommagement en fatigue cyclique et statique

Cette inversion de temps n'est pas observée pour les stratifiés [60,-60]_{ns} en UD carbone/epoxy étudiés dans [4]. Même pour des chargements élevés, les temps sont toujours plus courts pour des chargements cycliques (Fig. 7).

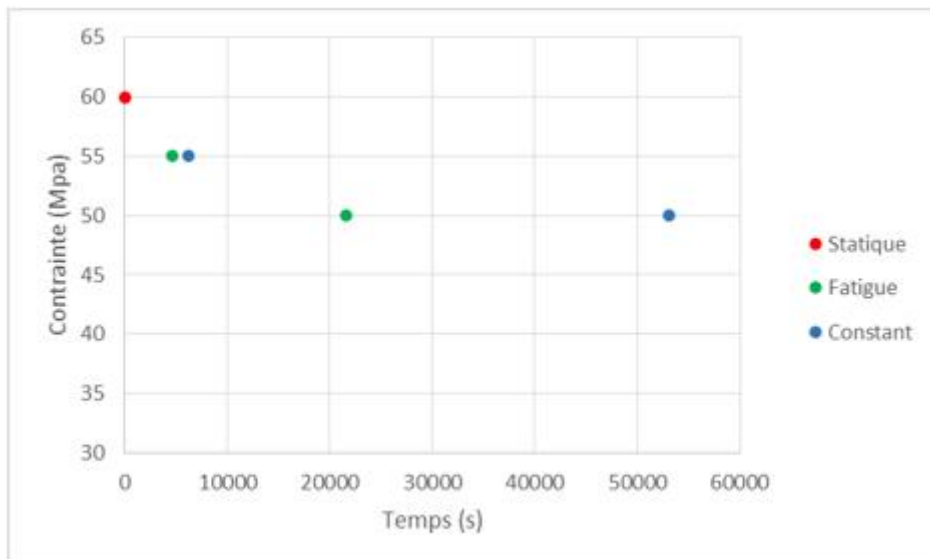


Fig. 7. Evolution de l'endommagement en fatigue cyclique et statique pour un UD carbone/epoxy [60,-60]_{ns}

L'analyse de ces courbes pour 2 matériaux différents montre un effet du cyclage qui accélère l'évolution de l'endommagement comparée à l'évolution pour un chargement constant.

4. Evolution de l'endommagement pour les différents chargements

Après l'analyse des évolutions des endommagements pour les différents types de chargement et les différents niveaux de chargement, on peut se demander si une loi d'évolution de la vitesse d'endommagement par rapport au temps qui dépendrait de la contrainte ne permettrait pas de décrire l'évolution en fatigue après intégration sur un cycle.

Si cette évolution ne dépend que du niveau de contrainte (et éventuellement de l'endommagement), la réponse à cette question est non. En effet, dans ce cas, l'évolution en fatigue statique devrait toujours être plus rapide qu'en fatigue cyclique (l'intégration en temps sera supérieur pour une contrainte constante que sur un cycle puisque la contrainte diminue dans ce cas). Il en est de même pour l'influence du coefficient R .

Dans le cadre d'un endommagement cumulé, nous étudions une loi d'évolution en fatigue statique d_{fs} déduite de la loi d'évolution en fatigue cyclique d_{fc} [3,5] :

$$d = d_s(\sigma_{max}, d) + d_{fc}(\sigma_{max}, \sigma_{min}, d) + d_{fs}(\sigma_{max}, d)$$

où l'évolution de l'endommagement en fatigue statique s'exprime par (en traction transverse uniquement) :

$$\frac{\delta d_{fs}}{\delta t} = (1-d)^\gamma \left\langle a_{fs} \left(Y_d \right)^\beta - Y_0^{fs} \right\rangle_+$$

où intervient la force associée à l'endommagement (par rapport à l'énergie de déformation en contraintes planes) [1-5]:

$$Y_d = \frac{\partial E_D^{ep}}{\partial d} = \frac{\langle \sigma \rangle_+^2}{2E^0(1-d)^2}$$

5. Conclusions

Les évolutions des endommagements matriciels en traction transverse pour un tissu déséquilibré verre/epoxy et pour différents types de chargement ont été étudiées. L'analyse des courbes montrent un effet du cyclage (pour les chargements plus faibles ou les nombres de cycles plus importants) qui accélère cette évolution comparée à l'évolution pour un chargement constant. Des essais dans le cas stratifiés [60,-60]_{ns} constitués de plis unidirectionnels carbone/epoxy montrent des résultats similaires [4].

Références

- [1] P. Ladeveze and E. Le Dantec. Damage modelling of the elementary ply for laminated composites. 43 (3) :257-267, 1992.
- [2] Y Thollon, C Hochard, A general damage model for woven fabric composite laminates up to first failure, *Mechanics of Materials* 41 (7), 820-827
- [3] C. Hochard, Y. Thollon, A generalized damage model for woven laminates under static and fatigue loading conditions, *Int. J. Fatigue*, 32(1), pp. 158-165, 2009.
- [4] A. Girardot, N. Lahellec, C. Hochard, S. Le Roch, Damage evolution under long-term, high and constant loading of a carbon/epoxy laminate. *ECCM17 Proceedings*, Munich, 2016.
- [5] C. Hochard, S. Miot, Y. Thollon, N. Lahellec, J.P. Charles, Fatigue of laminated composite structures with stress concentrations, *Composites: Part B*; 65 pp. 11-16, 2014.