



HAL
open science

Prévision de la durée de vie en fatigue des composites à matrice organique tissés interlock

Carole Rakotoarisoa, Frédéric Laurin, Martin Hirsekorn, Jean-François Maire, Stéphane Otin, Joseph Henry, Zoheir Aboura

► To cite this version:

Carole Rakotoarisoa, Frédéric Laurin, Martin Hirsekorn, Jean-François Maire, Stéphane Otin, et al..
Prévision de la durée de vie en fatigue des composites à matrice organique tissés interlock. 17èmes
Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.196.
hal-00597765

HAL Id: hal-00597765

<https://hal.science/hal-00597765>

Submitted on 1 Jun 2011

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.

Prévision de la durée de vie en fatigue des composites à matrice organique tissés interlock

Fatigue life time prediction of interlock woven fabric composites with polymer matrix

Carole Rakotoarisoa^{1,2}, Frédéric Laurin¹, Martin Hirsekorn¹, Jean-François Maire¹,
Stéphane Otin², Joseph Henry^{2,3} et Zoheir Aboura³

1 : Onera – The French Aerospace Lab
F – 92322 CHATILLON

e-mail : {carole.rakotoarisoa, frederic.laurin, martin.hirsekorn, jean-francois.maire}@onera.fr

2 : Snecma Villaroche
Rond-point René Ravaud, Réau – F – 77550 MOISSY-CRAMAYEL
e-mail : stephane.otin@sneema.fr

3 : Laboratoire Roberval
Université de Technologie de Compiègne – BP 20529 – F – 60205 COMPIEGNE CEDEX
e-mail : {joseph.henry, zoheir.aboura}@utc.fr

Résumé

Durant ces dernières années, l'Onera a développé un modèle d'endommagement (ODM_CMO) qui permet de décrire le comportement statique des composites tissés à matrice organique depuis l'évolution viscoélastique jusqu'à la ruine du matériau en prenant en compte les dommages matriciels et les ruptures de torons. Cette étude porte sur l'extension de ce modèle à la fatigue afin de prévoir la durée de vie de structures composites tissées interlock. Ainsi, nous utilisons une loi d'accumulation de l'endommagement matriciel écrite en fonction des forces motrices. Elle dépend principalement de la valeur maximale et également de l'amplitude de chargement. L'endommagement matriciel total (statique + fatigue) entraîne un transfert de charge sur les torons de fibres qui déterminent la ruine ou non du matériau. Un module statique permet de modéliser la montée en charge en s'intéressant particulièrement aux contraintes caractéristiques du chargement (σ_{\min} , σ_{moy} et σ_{\max}). A partir de l'endommagement matriciel qui en résulte, un module fatigue permet de déterminer l'accroissement d'endommagement matriciel en fonction du nombre de cycles et de réactualiser les variables nécessaires pour caractériser la ruine ou non du matériau et éventuellement reboucler sur le module fatigue. Les performances résiduelles peuvent être évaluées en repassant par le module statique.

Abstract

During these last years, the Onera developed a quasi-static damage model (ODM_CMO) for polymer matrix composites with woven fabric reinforcements from viscoelastic evolution to failure, taking into account matrix damages and fiber bundle fractures. This study deals with the model extension to fatigue loading in order to predict lifetime of interlock woven composite structures. Hence, we use a cumulative matrix damage law written as a function of the driving forces. This law depends mainly on maximum load but also on load amplitude. The total matrix damage (static + fatigue) leads to a load transfer on the fiber bundles, which determine the failure, or not, of the material. A static module enables the modeling of the first loading to maximum stress. This is done in three steps to save the strain fields at the loading characteristic stresses (σ_{\min} , σ_{moy} and σ_{\max}). From the resulting matrix damage, a fatigue module enables to determine the matrix damage growth as a function of number of cycles. It also enables to update the necessary variables to qualify the failure of the material, and if necessary to return them into the fatigue module. Residual performances can be estimated using the static module again.

Mots Clés : Composite à Matrice Organique, endommagement, statique, fatigue, tissé

Keywords: Polymer Matrix Composite, damage, static, fatigue, woven

1 Introduction

Les pièces fabriquées en composite sont de plus en plus utilisées, pour des durées plus longues et dans des conditions de plus en plus difficiles. Or, la durée de vie des structures composites est aujourd'hui encore mal connue. Pour pallier ces problèmes, des facteurs de sécurité souvent

importants sont utilisés dans le dimensionnement pour garantir la sûreté des pièces. C'est pourquoi la tenue en fatigue des composites devient une problématique industrielle majeure, notamment dans l'aéronautique. De plus, même si à ce jour les stratifiés sont les composites les plus utilisés pour les structures aéronautiques, on assiste depuis quelques années à l'émergence de pièces en composite à structure tissée 3D comme le montrent Mouritz *et al* [1] dans leur synthèse. Dans ce contexte, l'objet de cette étude est de proposer une méthode fiable pour la prévision de la durée de vie de structures composites à matrice organique (CMO) tissées 3D interlock.

Pour répondre à cet objectif, la stratégie consiste à utiliser le modèle d'endommagement ODM (Onera Damage Model), spécifiquement développé pour ce type de matériau, et à lui apporter des modifications et ajouts afin de l'étendre aux sollicitations de fatigue.

2 Comportement statique des CMO tissés

ODM_CMO (Onera Damage Model pour les CMO) est un modèle d'endommagement qui décrit le comportement statique des matériaux composites à matrice organique de type tissé 3D interlock [2]. Il est écrit en déformation pour faciliter sa mise en oeuvre dans un code de calcul par éléments finis tel que ZéBuLoN. De plus, il permet de décrire le comportement d'un CMO tissé depuis son comportement viscoélastique jusqu'à sa ruine en passant par l'endommagement de la matrice et la rupture progressive des torons (Fig. 1).

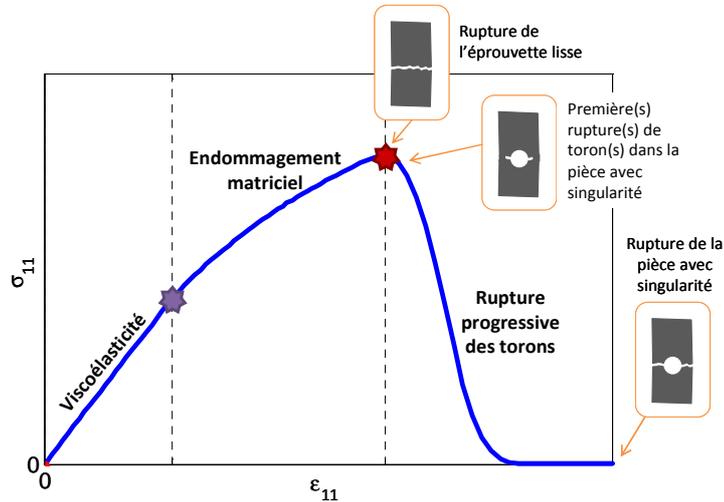


Fig. 1. Comportement général d'un composite à matrice organique

Le comportement complet du matériau viscoélastique endommageable s'écrit :

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{C}}^{eff} : (\underline{\underline{\epsilon}} - \underline{\underline{\epsilon}}^{ve} - \underline{\underline{\epsilon}}^{th} - \underline{\underline{\epsilon}}^0) - \underline{\underline{C}}^f : (\underline{\underline{\epsilon}}^r + \underline{\underline{\epsilon}}^s - \underline{\underline{\epsilon}}^0) \quad (\text{Eq. 1})$$

où $\underline{\underline{C}}^{eff}$ et $\underline{\underline{C}}^f$ sont respectivement le tenseur de rigidité effective totale et le tenseur de rigidité associé aux ruptures de torons de fibres seules. Ces tenseurs s'écrivent sous la forme suivante :

$$\underline{\underline{C}}^{eff} = (\underline{\underline{S}}^{eff})^{-1} = (\underline{\underline{S}}^0 + \Delta\underline{\underline{S}}^m + \Delta\underline{\underline{S}}^f)^{-1} \text{ et } \underline{\underline{C}}^f = (\underline{\underline{S}}^f)^{-1} = (\underline{\underline{S}}^0 + \Delta\underline{\underline{S}}^f)^{-1} \quad (\text{Eq. 2})$$

$\underline{\underline{\epsilon}}$ est le tenseur des déformations totales, $\underline{\underline{\epsilon}}^{ve}$ correspond aux déformations visqueuses, $\underline{\underline{\epsilon}}^{th}$ est le tenseur des dilatations thermiques, $\underline{\underline{\epsilon}}^0$ représente l'instant de fermeture des fissures. $\underline{\underline{\epsilon}}^r$ est le tenseur des déformations résiduelles induites par l'endommagement et $\underline{\underline{\epsilon}}^s$ le tenseur des

déformations stockées qui assure la continuité de la réponse σ - ε au moment de la fermeture des fissures. Les différentes sources de non linéarités seront détaillées dans les paragraphes suivants.

2.1 Comportement endommageable

Les CMO sont caractérisés par une anisotropie bien marquée du fait du contraste important entre les propriétés des fibres et de la matrice. Ainsi, l'orientation des dommages dépend, non plus du mode de chargement comme c'est le cas pour les composites à matrice céramique (CMC) et la plupart des matériaux métalliques, mais principalement de la microstructure. C'est pourquoi le modèle ODM_CMO prend en compte les différents mécanismes d'endommagement de la matrice à travers trois variables d'effets, $d_1^{(m)}$, $d_2^{(m)}$ et $d_3^{(m)}$, chacune liée à une direction principale du matériau (sens chaîne, trame et hors-plan) (Fig. 2).

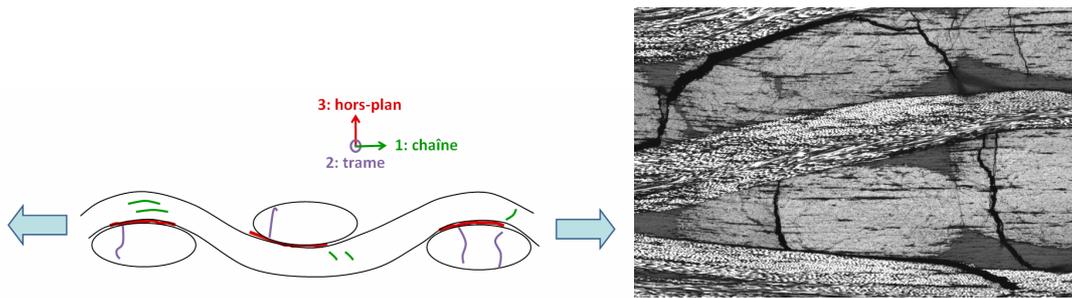


Fig. 2. Directions principales de l'endommagement au sein d'un matériau tissé

Les lois d'évolution du dommage matriciel sont définies classiquement au travers d'une fonction indicatrice F : si $F < 0$, il n'y a pas d'endommagement, si $F = 0$, il y a endommagement, tandis que le cas $F > 0$ est impossible. Cette fonction met en relation une variable d'endommagement $d_i^{(m)}$ et la force motrice de la propagation des défauts $y_i^{(m)}$ de la manière suivante:

$$F_i(y_i^{(m)}, d_i^{(m)}) = g_i(y_i^{(m)}) - d_i^{(m)} \quad (\text{Eq. 3})$$

Les forces motrices s'écrivent sous la forme :

$$y_i^{(m)} = \frac{1}{2} \underline{\underline{\varepsilon}} : \underline{\underline{\Lambda}} : \underline{\underline{\varepsilon}} \quad \text{avec } \underline{\underline{\Lambda}} \text{ tenseur d'ordre 4} \quad (\text{Eq. 4})$$

De plus, les observations expérimentales montrent qu'il existe un couplage plan/hors-plan dans les dommages matriciels. Du fait de l'architecture spécifique des composites à renfort tissé, un dommage dans la direction hors-plan peut se développer lors de sollicitations uniquement dans le plan.

2.2 Caractère unilatéral du dommage

L'apparition de fissures dans la matrice va entraîner une augmentation de la souplesse du matériau, considéré orthotrope, au travers des tenseurs d'effet du dommage matriciel $\underline{\underline{H}}_i^m$. Le tenseur des souplesses effectives du matériau dépendant des dommages matriciels s'écrit donc:

$$\underline{\underline{S}}^{eff} = \underline{\underline{S}}^0 + \sum_i \frac{d_i^m}{1-d_i^m} \cdot \left[\eta_i^m \underline{\underline{H}}_i^{(m)+} + (1-\eta_i^m) \underline{\underline{H}}_i^{(m)-} \right] \quad (\text{Eq. 5})$$

De plus, l'aspect unilatéral du dommage, consistant à distinguer un état actif des fissures (fissures ouvertes) et un état passif (fissures fermées) sous l'effet de la compression (Fig. 3) est pris en compte dans le modèle. Toutefois, nous considérons que même si les fissures sont refermées, les dommages peuvent encore avoir un effet sur l'anisotropie du matériau (désactivation partielle). De plus, l'ensemble des fissures ne se ferment pas complètement d'un coup (désactivation progressive). De ce fait, les indices de désactivation (notés η_i^m) permettent de décrire une fermeture progressive des fissures distinguant trois états : l'état passif où toutes les fissures sont fermées, un état actif où toutes les fissures sont ouvertes et un état intermédiaire pour lequel certaines fissures sont ouvertes et d'autres fermées [3].

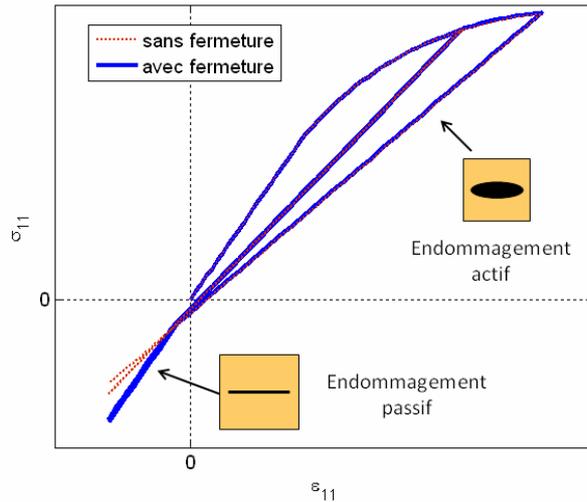


Fig. 3. Prise en compte du caractère unilatéral du dommage lors d'un essai de traction incrémentale sens chaîne

2.3 Viscosité spectrale non linéaire de la matrice

Les CMO ont un comportement non-linéaire et dépendant du temps dû à la résine polymère. Pour prendre en compte ces effets temporels, il est nécessaire de décrire le comportement visqueux de la matrice. Le modèle viscoélastique spectral utilisé décompose la viscosité en une somme de mécanismes élémentaires visqueux, chacun défini par un temps de relaxation et un poids. De plus, le comportement visqueux des CMO est fortement non-linéaire. Ainsi, les mécanismes élémentaires visqueux sont décrits par des équations différentielles dans lesquelles est introduite une fonction non linéarisante fonction de la contrainte [4].

2.4 Rupture progressive des torons de fibres

La rupture d'un toron de fibres est catastrophique pour une éprouvette lisse. Cependant, pour une pièce générique ou une structure présentant une singularité géométrique, le chargement auquel elle est soumise va engendrer des concentrations de contraintes qui entraîneront des ruptures de torons sans signifier pour autant la ruine instantanée de la pièce (cf. Fig. 1). Ainsi, il est nécessaire de prendre en compte la rupture de torons pour pouvoir décrire le comportement d'une pièce en CMO tissée jusqu'à sa ruine.

Les variables d'endommagement liées aux ruptures de torons et leurs lois d'évolution sont définies de la même manière que pour les dommages matriciels décrits dans le paragraphe 2.1.

Les forces motrices associées aux ruptures de torons sont écrites sous la forme :

$$y_j^{(f)} = \frac{1}{2} \alpha(d_j^{(m)}) (\underline{\varepsilon} : \underline{\underline{\Lambda}} : \underline{\varepsilon}) \quad (\text{Eq. 6})$$

avec $\alpha(d_j^{(m)})$ permettant de décrire l'influence de l'endommagement matriciel sur les ruptures des torons, et $\underline{\underline{\Lambda}}$ tenseur d'ordre 4 (qui a pour unité des MPa).

Les ruptures de torons rendent le comportement adoucissant. Pour éviter les problèmes de dépendance au maillage, nous limitons la vitesse d'évolution des ruptures de torons par la méthode de l'effet retard [2].

3 Comportement en fatigue des CMO tissés

Lors d'un essai de fatigue, à cause du chargement cyclique, de plus en plus de fissures vont se créer dans la matrice. Ainsi, à l'endommagement de la matrice créé durant la montée en charge (chargement statique) va s'ajouter un accroissement d'endommagement dû au chargement cyclique qui n'était pas décrit par la version précédente du modèle ODM_CMO.

3.1 Prise en compte de l'endommagement de fatigue

Pour modéliser ce comportement en fatigue à partir du modèle statique, deux méthodes peuvent être utilisées : 1/ intégrer tous les cycles du chargement en incluant toute la physique de l'endommagement [5], 2/ définir l'accroissement d'endommagement comme une fonction du nombre de cycles [6-9].

La première méthode consisterait en quelques sortes à définir un modèle d'endommagement statique amélioré que l'on appliquerait à chaque cycle. On parle alors de modèle d'endommagement incrémental. Il s'agit d'une méthode très coûteuse en temps de calcul de par la complexité et la multiplicité des phénomènes qui apparaissent dans les composites tissés interlock à matrice organique. On peut ajouter à cette méthode le principe de « saut de cycles » qui consiste à évaluer le nombre de cycles pendant lequel l'évolution de l'endommagement est relativement constante. Ainsi, seuls quelques cycles bien précis seraient intégrés réduisant ainsi les coûts de calcul de la méthode.

La seconde méthode consiste, quant à elle, à définir de façon phénoménologique un accroissement d'endommagement induit par un chargement de fatigue et d'ajouter cet accroissement à l'endommagement généré lors de la montée en charge (chargement statique). On parle alors de modèle d'endommagement cumulé. Ensuite, les différentes variables (σ , ε , $y_i \dots$) sont réactualisées et l'endommagement dans les torons est estimé afin de prévoir la rupture de l'éprouvette.

Dans le cadre de cette étude, les exigences industrielles nous ont orienté plutôt vers le développement d'un modèle d'endommagement cumulé. Ainsi, l'endommagement matriciel total est la somme de l'endommagement matriciel induit par un chargement statique (durant la montée en charge) et de l'endommagement matriciel induit par les cycles de fatigue.

3.2 Hypothèses de construction du modèle

Pour construire notre modèle de fatigue à partir du modèle d'endommagement statique ODM_CMO, nous nous basons sur plusieurs hypothèses, usuellement utilisées :

- La première consiste à considérer que le seuil de rupture des torons correspond à la rupture de l'éprouvette lisse sans singularité géométrique [2].
- La seconde à supposer que les mécanismes d'endommagement qui apparaissent en fatigue sont les mêmes que ceux observés en statique (hypothèse faite sur la base d'essais expérimentaux) [10].
- Enfin, on suppose que l'endommagement matriciel va croître en fonction du nombre de cycles, mais que les fibres sont quant à elles insensibles à la fatigue [11].

Pour définir cet accroissement d'endommagement matriciel, le nombre de cycles ainsi que leurs caractéristiques telles que le rapport de charge R et la contrainte maximale des cycles sont souvent pris en compte dans la modélisation. Dans notre modélisation, on supposera que les forces motrices des dommages matriciels en statique pilotent également les dommages en fatigue. Ainsi,

l'accroissement d'endommagement n'est plus dépendant du tenseur des contraintes mais des forces motrices des dommages matriciels permettant de passer d'une vision tensorielle à une vision scalaire du chargement, plus simple à analyser et à généraliser aux sollicitations multiaxiales. Enfin, les endommagements (statique + fatigue) au sein de la matrice vont modifier le transfert de charge sur les torons de fibres. Ce phénomène sera traduit par une augmentation des forces motrices des ruptures de torons induisant la ruine de l'éprouvette lisse lorsque le seuil d'endommagement des torons sera atteint, ce qui nous permet de construire ainsi un modèle de prévision de la durée de vie.

3.3 Stratégie de modélisation

Le chargement est abordé par blocs de cycles (Fig. 4), et nous considérons ici le cas d'un chargement cyclique monotone piloté en contrainte pour illustrer la stratégie de modélisation mise en place.

Le modèle proposé se décompose en deux modules principaux : un module statique et un module fatigue.

Le **module statique** permet de modéliser (i) la montée en charge jusqu'à σ_{\min} puis (ii) le premier demi-cycle durant lequel les déformations sont enregistrées aux trois contraintes caractéristiques des cycles : σ_{\min} (contrainte minimale), σ_{moy} (contrainte moyenne) et σ_{\max} (contrainte maximale), comme montré sur la Fig. 4. L'endommagement matriciel n'est quant à lui enregistré que pour σ_{\max} .

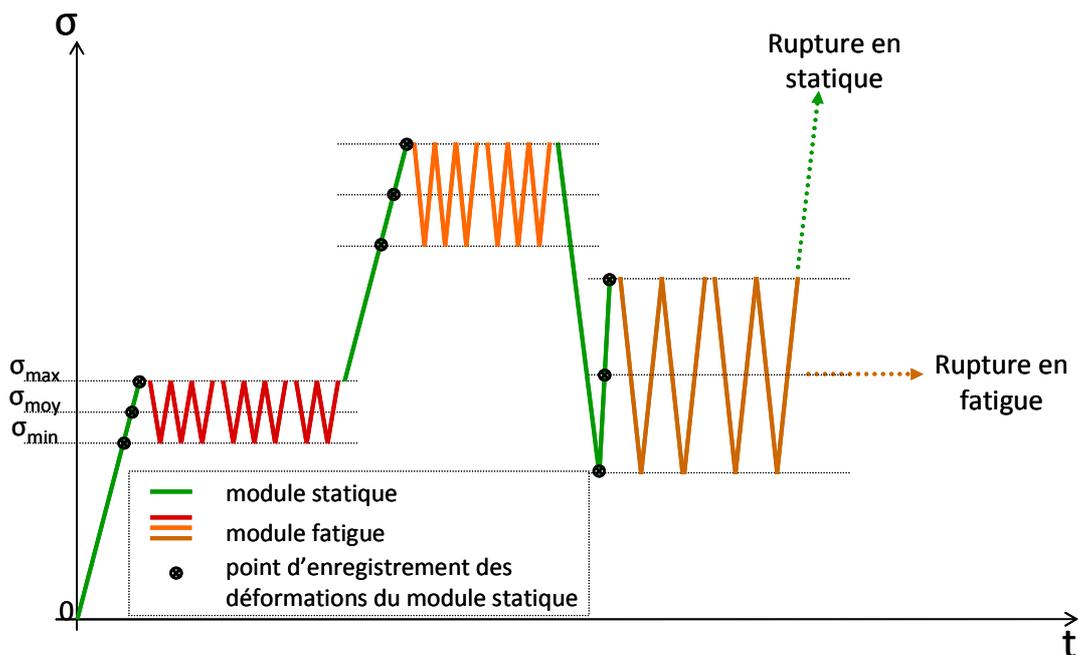


Fig. 4. Mise en évidence des parties du chargement prises en charge par les modules statique et fatigue

Le **module fatigue** sert à déterminer l'accroissement d'endommagement matriciel en fonction du nombre de cycles ΔN à partir d'une loi d'endommagement cumulée et de l'endommagement matriciel enregistré par le module statique.

On peut alors choisir de piloter le module fatigue de deux manières. La plus évidente consiste bien sûr à piloter en nombre de cycles et calculer l'accroissement d'endommagement induit. La seconde manière consiste à piloter l'accroissement d'endommagement lui-même, et déterminer le nombre de cycles nécessaires pour créer l'accroissement voulu. Mais dans ce cas, il sera important d'adopter une stratégie pour passer au calcul par éléments finis.

Dans un premier temps, le calcul sera donc piloté en nombre de cycles et la stratégie de modélisation est schématisée sur la Fig. 5.

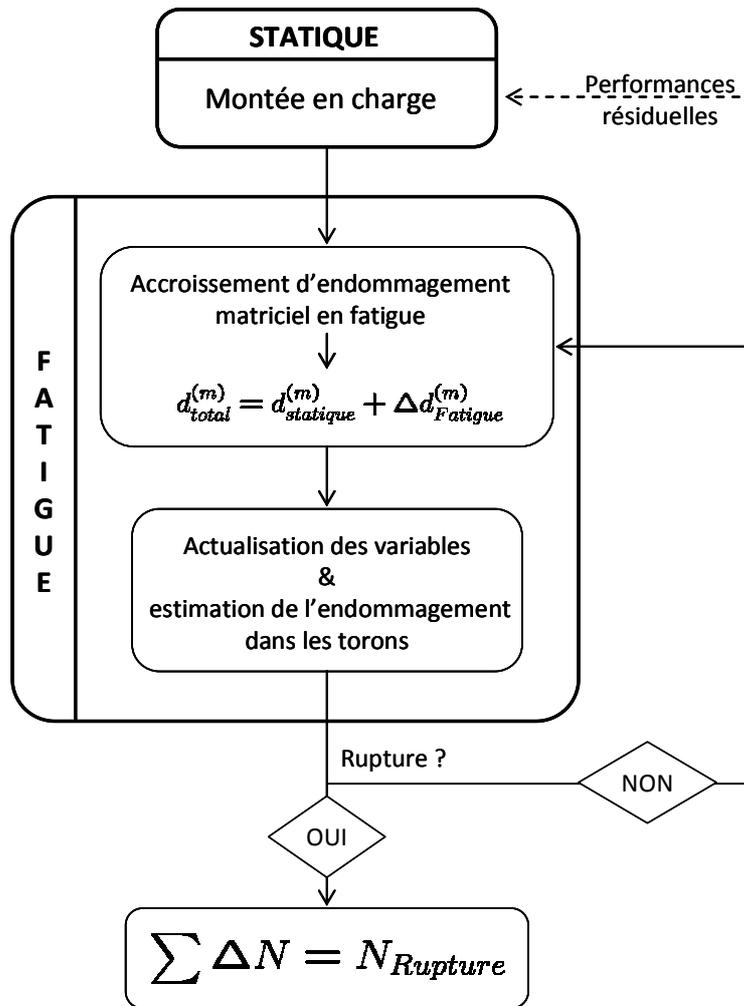


Fig. 5. Schéma de fonctionnement du modèle ODM_CMO en fatigue

3.4 Mise en œuvre

a. Modèle d'endommagement cumulé

La forme de la loi d'évolution en fatigue proposée est donnée par :

$$\frac{\partial d_i^{(m)}}{\partial N} = (d_{c(i)}^{Fatigue} - d_i^{(m)})^{\gamma_i} \left(1 + \left(\frac{\Delta y_i}{\Delta y_{0(i)}^{Fatigue}} \right)^{\beta_i} \right) \left(\frac{\langle y_{(i)\max} - y_{0(i)}^{Fatigue} \rangle_+}{y_{c(i)}^{Fatigue}} \right)^{\alpha_i} \quad (\text{Eq. 7})$$

et :

$$\Delta y_i = y_{(i)\max} - y_{(i)\min} \quad (\text{Eq. 8})$$

où $d_i^{(m)}$ est l'endommagement matriciel total (statique + fatigue), N le nombre de cycles, $y_{(i)\min}$ et $y_{(i)\max}$ sont les valeurs minimales et maximales des forces motrices. $d_{c(i)}^{Fatigue}$ est la valeur de saturation de l'endommagement matriciel en fatigue (intrinsèque au matériau), $y_{0(i)}^{Fatigue}$ est le seuil d'endommagement en fatigue, $\langle \rangle_+$ sont les crochets de Macaulay et α_i , β_i , γ_i , $\Delta y_{0(i)}^{Fatigue}$ et $y_{c(i)}^{Fatigue}$ sont des paramètres du modèle à identifier.

Cette loi adimensionnée est inspirée de celle proposée par Sidoroff et Subiago [6] en déformation, également reformulée par Van Paepegem et Degrieck [7] en contrainte:

$$\frac{\partial D}{\partial N} = a \frac{(\Delta \varepsilon)^\beta}{(1-D)^\gamma} \quad (\text{Eq. 9})$$

Ici, nous écrivons la loi en termes de forces motrices à l'image des travaux de Hochard et Thollon [8] et de Gornet et Ijaz [9] pour des raisons expliquées dans le paragraphe précédent. Le premier terme de l'Eq. 7 permet de limiter l'endommagement matriciel à la valeur de saturation $d_c^{Fatigue}$ contrairement aux modèles existants dans la littérature. On considère, dans un premier temps, que la saturation d'endommagement matriciel en fatigue est identique à celle définie pour l'endommagement matriciel en statique. Cette hypothèse devra être validée au travers de résultats d'essais. En effet, la ruine du matériau est pilotée par les ruptures de torons et non par l'endommagement matriciel (cf. Fig. 6). Toutefois, l'endommagement matriciel induit un report de charge de la matrice sur les torons entraînant ainsi une ruine prématurée de la structure. En effet, dans ODM, les variables d'endommagement sont caractérisées entre autres par un seuil d'activation et une valeur à saturation. Cependant, cette valeur de saturation en statique n'est identifiée que de manière approchée dans la mesure où pour un essai de traction monotone (statique) la ruine du matériau arrive souvent avant d'atteindre ce palier de saturation. Néanmoins, cette valeur de saturation est nécessaire de manière à empêcher la rigidité de s'annuler grâce à l'endommagement matriciel seul.

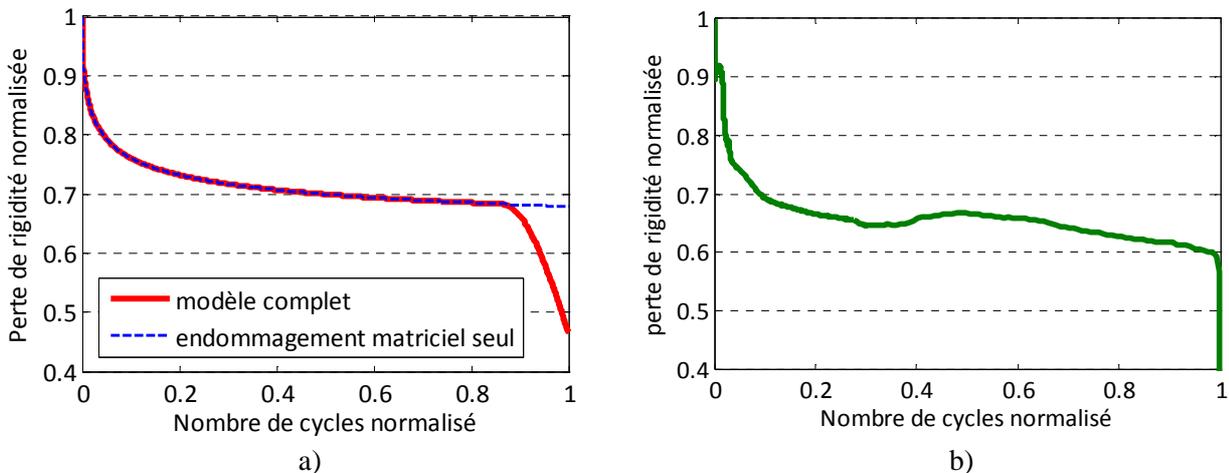


Fig.6. Mise en évidence de l'influence des ruptures de torons sur l'évolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles ; a) simulation avec ODM_CMO en fatigue (identifiée qualitativement) et b) courbe expérimentale

De plus, l'expérience montre que l'apparition et la propagation de dommages dans la matrice dépendent à la fois de la valeur maximale du chargement appliquée et de son amplitude. Ce phénomène est pris en compte en introduisant, dans l'évolution de l'endommagement matriciel en fonction du nombre de cycles (Eq. 7), la valeur maximale de la force motrice y_{max} (atteinte pour la valeur maximale du chargement) et la variation de la force motrice durant un cycle Δy (reliée à l'amplitude). Cependant, on considère que la valeur maximale y_{max} a un effet plus important sur l'évolution de l'endommagement matriciel que l'amplitude.

Enfin, notons que le seuil d'endommagement en fatigue $y_0^{Fatigue}$ aura une valeur inférieure ou égale à celle observée en statique. En effet, pour des valeurs maximales inférieures au seuil d'activation statique, l'effet de cyclage pourrait entraîner l'apparition d'un endommagement que l'on n'observerait pas pour un simple chargement statique à la même contrainte.

b. Réactualisation des variables

Rappelons que nous considérons ici que la rupture des torons de fibres conduit à la ruine de la structure (hypothèse valable pour les plaques sans singularité géométrique). Ainsi, il est nécessaire de réactualiser les champs de déformations (les contraintes sont connues puisque imposées) pour connaître le report de charge sur les torons de fibres dû à l'accroissement de l'endommagement matriciel en fatigue via l'évolution des forces motrices $y^{(f)}$ définie à l'Eq. 6. On peut dans le même temps réactualiser l'accroissement des forces motrices de l'endommagement matriciel pour éventuellement reboucler sur le module fatigue.

Pour cette réactualisation des variables, on veut éviter de devoir repasser par le module statique qui intègre la loi de comportement sur un cycle complet. En effet, seules les données aux points caractéristiques du chargement nous intéressent. Ainsi, le module fatigue permet de calculer l'accroissement d'endommagement matriciel mais sert également à réactualiser les champs de déformations pour les contraintes minimale, moyenne et maximale du chargement et définir les nouvelles forces motrices de l'endommagement matriciel ainsi que le report de charge sur les torons. Les déformations élastiques (minimales, moyennes et maximales) sont calculées en actualisant le tenseur des souplesses par rapport à l'accroissement d'endommagement matriciel (Fig. 6). Les déformations résiduelles sont recalculées pour la valeur maximale des déformations. Les déformations visqueuses sont recalculées en considérant le chargement de fatigue comme un fluage à la contrainte σ_{moy} pendant une durée égale au nombre de cycles ΔN divisé par la fréquence. A partir de ces déformations (élastiques, résiduelles et visqueuses), on en déduit les déformations totales minimale, moyenne et maximale, puis les forces motrices de l'endommagement matriciel (y_{min} , y_{moy} et y_{max}) et les forces motrices pour l'estimation des ruptures de torons. En fonction des résultats de cette réactualisation, on déduit si la rupture de torons (et donc de la structure) a eu lieu ou non.

S'il y a rupture, le nombre de cycles imposés correspond au nombre de cycles à rupture. Sinon, deux choix sont possibles : reboucler sur le module de fatigue, ou repasser par le module statique pour évaluer les performances résiduelles.

Notons que les effets de fréquence (hors phénomènes d'auto-échauffement) sont naturellement pris en compte à travers l'évolution des déformations visqueuses au cours du cyclage et dépendent directement de la contrainte moyenne des cycles.

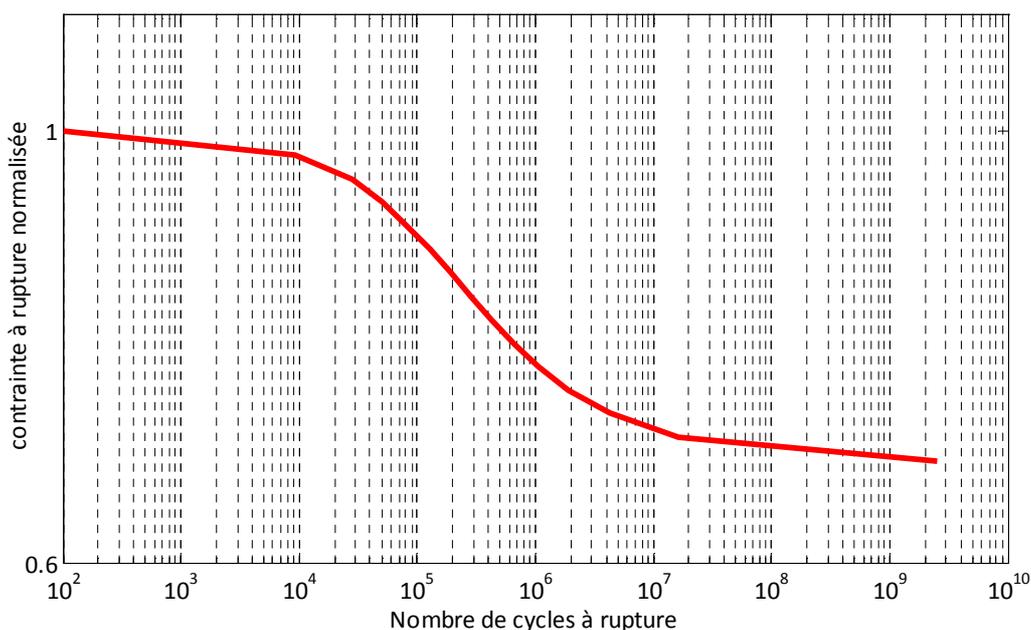


Fig.7. Courbe de Wöhler simulée par ODM_CMO en fatigue

Ce modèle analytique est implanté dans Matlab et son identification, ainsi que sa validation sont en cours au travers de comparaisons avec des résultats d'essais sur plaques tissées 3D interlocks testées sous chargement de fatigue cyclique réalisés à l'UTC [12] et à Snecma.

4 Conclusion

ODM_CMO est un modèle d'endommagement qui décrit le comportement statique des CMO tissés depuis l'évolution viscoélastique jusqu'à la ruine du matériau en prenant en compte les dommages matriciels et les ruptures de torons. Pour étendre ce modèle à la fatigue, nous utilisons une loi d'accumulation d'endommagement écrite en fonction des forces motrices, et dépendant principalement de la valeur maximale des forces motrices et également de leur amplitude entre la valeur maximale et la valeur minimale durant un cycle. De plus, nous considérons qu'il existe une valeur de saturation à l'endommagement matriciel en fatigue que l'on suppose égale à la valeur de saturation en statique. L'endommagement matriciel total (statique + fatigue) entraîne un transfert de charge sur les torons de fibres qui vont déterminer la ruine du matériau. En ce qui concerne le fonctionnement du modèle, le module statique est utilisé dans un premier temps pour modéliser la montée en charge et le premier demi-cycle en trois étapes pour enregistrer les déformations aux trois contraintes caractéristiques des cycles (σ_{\min} , σ_{moy} et σ_{\max}). Après avoir calculé l'évolution de l'endommagement matriciel en fonction du nombre de cycles imposés, les champs de déformations et les dommages dans les torons de fibres sont réactualisés. S'il y a rupture des torons et donc de l'éprouvette, le nombre total de cycles correspond au nombre de cycles à rupture. S'il n'y a pas rupture du matériau, on peut soit reboucler sur le module fatigue pour déterminer le nombre de cycle à rupture soit éventuellement évaluer les performances résiduelles en effectuant par la suite un chargement statique par le module statique.

Le modèle proposé est valable pour des chargements de fatigue pour lesquels aucun échauffement notable de l'éprouvette, induisant une modification de la viscosité de la matrice, n'est mesuré. Ce modèle doit maintenant être validé sur des essais en cours de réalisation à Snecma et l'UTC Compiègne.

Références

- [1] A.P. Mouritz, M.K. Bannister, P.J. Falzon, K.H. Leong, « Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites ». *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, Vol. 30, pp. 1445-1461, 1999.
- [2] L. Marcin, « Modélisation du comportement de l'endommagement et de la rupture de matériaux composites à renforts tissés pour le dimensionnement robuste de structures ». *Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux I / Onera Châtillon*, 2010.
- [3] J.-F. Maire, J.-L. Chaboche, « A new formulation of Continuum Damage Mechanics (CDM) for Composite Materials ». *Aerospace Science and Technology*, Vol. 4, pp. 247-257, 1997.
- [4] A. Schieffer, J.-F. Maire, D. Lévêque, «A coupled analysis of mechanical behaviour and ageing for polymer-matrix composites ». *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 543-549, 2002.
- [5] J. Lemaitre, R. Desmorat, M. Sauzay, «Anisotropic damage law of evolution ». *European Journal of Mechanics*, Vol. 19, pp. 187-208, 2000.
- [6] F. Sidoroff, B. Subiago, « Fatigue damage modelling of composite materials from bending tests ». *Proceedings of the Sixth International Conference on Composite Materials (ICCM-VI) and Second European Conference on Composite Materials*, Vol. 4, pp. 4.32-4.39, 1987.
- [7] W. Van Paeppegem, J. Degrieck, « Experimental set-up for and numerical modelling of bending fatigue experiments on plain woven glass/epoxy composites ». *Composite Structures*, Vol. 51, pp. 1-8, 2001.
- [8] Ch. Hochard, Y. Thollon, « A generalized damage model for woven ply laminates under static and fatigue loading conditions ». *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, pp. 158-165, 2010.
- [9] L. Gornet, H. Ijaz, « High cycle fatigue damage model for delamination crack growth in CF/Epoxy composite laminates ». *International Journal of Damage Mechanics*, 2010.
- [10] S. Miot, «Rupture de structures composites stratifiées sous chargements statique et de fatigue ». *Thèse de doctorat Aix-Marseille Université*, 2009.
- [11] D.Y. Song, O. Nobuo, «Approximate estimation of fatigue strength of polymer matrix composites by material properties ». *Materials Science and Engineering A*, Vol. 254, pp. 200-206, 1998.
- [12] J. Henry, Z. Aboura, K. Khellil, S. Otin, «Multi instrumentation pour le suivi de l'endommagement sur composite interlocks carbone/époxy en fatigue ». *Colloque Mécamat, Aussois*, 2011.