



HAL
open science

Sur les difficultés de réaliser des analyses fiables des essais de fatigue sur composites

Laura Muller, Fabrizio Pagano, Myriam Kaminski, Francois-Henri Leroy,
Jean-François Maire

► **To cite this version:**

Laura Muller, Fabrizio Pagano, Myriam Kaminski, Francois-Henri Leroy, Jean-François Maire. Sur les difficultés de réaliser des analyses fiables des essais de fatigue sur composites. 21ème Journées Nationales sur les Composites, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) - Bordeaux, Jul 2019, Bordeaux, Talence, France. hal-02420745

HAL Id: hal-02420745

<https://hal.science/hal-02420745>

Submitted on 20 Dec 2019

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.

Sur les difficultés de réaliser des analyses fiables des essais de fatigue sur composites

On the difficulties to perform reliable analyses of fatigue tests on composites

Laura Muller, Fabrizio Pagano, Myriam Kaminski, François-Henri Leroy et Jean-François Maire

DMAS
ONERA – Université Paris Saclay
F-92322 Châtillon – France
e-mail : Jean-Francois.Maire@onera.fr

Résumé

La fatigue des structures composites préoccupe de plus en plus l'industrie aéronautique et incite les industriels à développer une modélisation précise, des techniques expérimentales spécifiques et des outils d'analyse dédiés à la fatigue des composites.

Après avoir introduit le contexte, les techniques expérimentales et leurs instrumentations spécifique à la fatigue des composites, nous détaillerons les méthodes d'analyse et les différentes voies pour modéliser ces phénomènes.

Abstract

Fatigue of composite structures presents an increasing concern to the aerospace industry and leads industrialists to develop accurate modelling, specific experimental techniques and analysis tools dedicated to composite fatigue.

After introducing the context, the experimental techniques and their instrumentations specific to the fatigue of the composites, we will present the analysis methods and the different ways to model these phenomena.

Mots Clés : Fatigue, durée de vie, auto-échauffement, diagramme iso-durée de vie, modèle d'endommagement

Keywords : Fatigue, lifetime, self-heating, Constant fatigue life diagram, damage model

1. Introduction

Si la fatigue métallique a été étudiée de manière intensive depuis plus de 150 ans à partir de concepts bien établis, la situation des matériaux composites est assez différente. De par la nature diverse des matériaux couverts par le terme « Composites », il est difficile d'obtenir un consensus sur la manière d'approcher le comportement à la fatigue de ces matériaux, même en se limitant aux composites à fibres continues et à matrice polymère. Les bonnes propriétés spécifiques de ces matériaux mais aussi leur résistance assez exceptionnelle à la fatigue est à l'origine de leur succès dans l'industrie aéronautique. Toutefois, ce très bon comportement ne signifie pas que les matériaux composites sont totalement à l'abri de la fatigue. En réalité, la durée de vie d'une structure composite varie en fonction du type de fibres, de la résine, des empilements, de l'architecture fibreuse, des conditions de fabrication (contraintes résiduelles) et bien sûr du type de sollicitations. Ainsi, depuis quelques années, poussé surtout par l'utilisation de ces matériaux dans des « machines tournantes » (pale d'éolienne, aube FAN,...), la tenue en fatigue de structures composites et les études associées sont devenues des thèmes d'intérêt majeurs pour certains industriels.

2. Spécificité de la fatigue des matériaux composites à fibres continues

La fatigue désigne l'endommagement d'une pièce sous l'effet d'efforts répétés (forces appliquées, vibrations, rafales de vent,...). Alors que la pièce est conçue pour résister à des efforts donnés, l'application répétée d'efforts à des niveaux plus faibles peut provoquer sa

défaillance. La durée de vie (DdV) est alors définie comme le temps ou le nombre de cycles pour obtenir la défaillance ou la perte de fonctionnalité de la structure.

Contrairement aux métaux, les matériaux composites sont hétérogènes et souvent anisotropes. Ils accumulent les dommages de manière souvent plus localisée et leur défaillance ne se produit pas toujours par la propagation d'une fissure macroscopique unique. Les mécanismes microstructuraux de l'accumulation des dommages, y compris la fissuration de la matrice, la décohésion fibre/matrice, la rupture des fibres ou le délaminage, se produisent parfois indépendamment et parfois de manière interactive. La prédominance de l'un ou de l'autre de ces dégradations peut être fortement affectée par la nature des constituants et par les conditions d'essai. Les dommages n'affectent pas toujours immédiatement la résistance du composite bien que souvent ils en réduisent la rigidité. À un stade ultérieur de la vie, la quantité de dommages accumulés dans certaines régions du composite peut être si importante que localement, la capacité résiduelle du composite tombe au niveau de la contrainte maximale du cycle de fatigue induisant la défaillance de l'éprouvette.

La fatigue des matériaux composites a été longtemps considérée comme une problématique non prioritaire car ces matériaux y sont naturellement peu sensibles. C'est l'augmentation continue des chargements imposés aux structures composites dans les dimensionnements qui engendre aujourd'hui des problèmes potentiels de durée de vie. Or la fatigue des composites est un processus qui échappe aux méthodologies prédictives développées historiquement pour les métalliques et qui présente une plus forte dispersion. Une approche spécifique doit donc être mise en place [1-2].

Les principales spécificités du comportement en fatigue des composites sont résumées ci-dessous :

- Les matériaux composites présentent une meilleure résistance à la fatigue par rapport aux métaux. Le rapport entre la résistance à la fatigue en traction – traction et la résistance statique en traction est toujours supérieur à 0,4 et peut atteindre 0,8 pour les composites à fibres de carbone alors que ce rapport vaut seulement 0,3 pour les alliages d'aluminium.
- La Fig. 1 montre schématiquement la comparaison du cumul de dommages entre les matériaux composites et métalliques en fonction du nombre de cycles. Si durant une part importante de la vie totale des métaux, aucun phénomène n'est réellement visible (phase d'amorçage), pour les composites, les dommages commencent très tôt parfois dès le premier cycle. Cette détérioration précoce est suivie d'une deuxième étape de dégradation plus progressive, caractérisée par une réduction de la rigidité. Des dommages plus graves, tels que la rupture de fibres et la croissance instable de délaminage, apparaissent au troisième stade conduisant souvent à une défaillance catastrophique.
- Comme en statique, la résistance à la fatigue des matériaux composites à matrice polymère est généralement plus faible (voir beaucoup plus faible) en compression qu'en traction, alors que c'est le contraire pour les alliages métalliques.
- Les performances en fatigue des composites dépendent de la nature des constituants (fibre, matrice, interphase) mais surtout de l'arrangement des renforts (fibres courtes, fibres longues ou continues, renforts tissés ou unidirectionnels).
- Une particularité est que pour les composites ayant des constituants avec des propriétés «améliorées», tels que des fibres haute résistance, des matrices à forte ténacité et une bonne adhésion fibre-matrice, une amélioration des performances en fatigue, c'est à dire un allongement de la durée de vie n'est pas toujours observée.

Dans la suite de cet article, nous nous intéresserons plus spécifiquement à la fatigue des composites à fibres continues de Carbone ou de Verre, tissées ou unidirectionnelles, à résines therm durcissables et thermoplastiques.

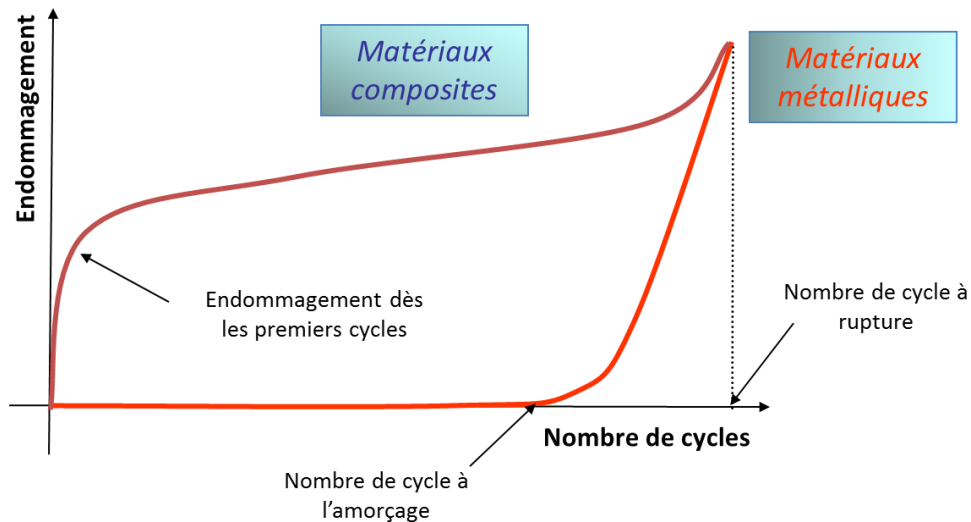


Fig. 1. Comparaison de l'évolution des dommages en fonction du nombre de cycles entre composite et métal

3. Difficultés liées à la réalisation d'essais de fatigue sur composites

Les essais de fatigue sur composites sont particulièrement délicats et nécessitent des précautions accrues par rapport aux matériaux métalliques. Plusieurs raisons peuvent être avancées (i) l'anisotropie (ii) la complexité des mécanismes de dégradation (iii) la représentativité des éprouvettes liée à la forte sensibilité aux procédés (iv) des différences prononcées entre traction et compression et (v) des effets d'environnement marqués (température, humidité).

Pour illustrer ces difficultés, on peut signaler les essais sur UD à 0° ([3]). En effet, il est très difficile de réaliser ces essais qui nécessitent la conception particulière des mors, un soin dans le dimensionnement des éprouvettes, l'ajout de talons et une minutie absolue dans la réalisation de l'essai.

Ces difficultés peuvent expliquer en partie une variabilité supérieure observée sur les composites à celle observée sur les métaux. Néanmoins, l'étude expérimentale de la fatigue des composites bénéficie d'un atout fort : il est possible de suivre, voire de quantifier, les dégradations au cours des cycles.

4. Les techniques d'instrumentation des essais de fatigue

Au-delà de l'instrumentation extensométrique classique, il est donc possible plus facilement que sur les métaux d'avoir un suivi des dommages qui se produisent lors de la répétition des cycles.

4.1 Apport du suivi par Emission Acoustique

L'émission acoustique (EA) correspond à un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes transitoires au sein d'un matériau qui se produisent en particulier lors de création de fissures, de décohésion ou de rupture de fibres. C'est une technique d'instrumentation devenue classique pour les composites ([3-4]) et qui peut facilement être utilisée en fatigue (même s'il faut être vigilant sur le volume d'informations stockées). En utilisant plusieurs capteurs, il est possible de retenir les signaux acoustiques provenant uniquement de la partie utile de l'éprouvette. De nombreux travaux ont montré que l'information ainsi obtenue est alors un indicateur pertinent pour suivre les phénomènes d'endommagement en général et en fatigue en particulier. Beaucoup de travaux ont également été menés pour corrélérer ces signaux avec chacun des mécanismes intervenant au sein du

composite. Ces méthodes de classification basées, soit sur des techniques d'apprentissage, soit des analyses statistiques, donnent des résultats intéressants mais parfois contradictoires.

4.2 Apport de la vibrothermographie

Le principe de la vibrothermographie ou des essais d'auto-échauffement ([5-6-7]) est de mettre en place un suivi thermographique des dissipations qui ont lieu dans le matériau. Comme illustré sur la Fig. 2, ces essais consistent à appliquer des cycles à des niveaux de contraintes fixes et de mesurer l'échauffement de l'éprouvette (plus précisément soit la vitesse d'auto-échauffement initiale $\dot{\theta}_0$, soit la température d'auto-échauffement stabilisé θ_F). Lorsque l'on reporte ces informations en fonction du niveau de charge appliqué, on peut définir trois zones qui définissent le domaine ① où la fatigue n'est pas vraiment problématique, le domaine ③ où la durée de vie sera très réduite et enfin le domaine ② où il est requis de mener des études approfondies de la fatigue.

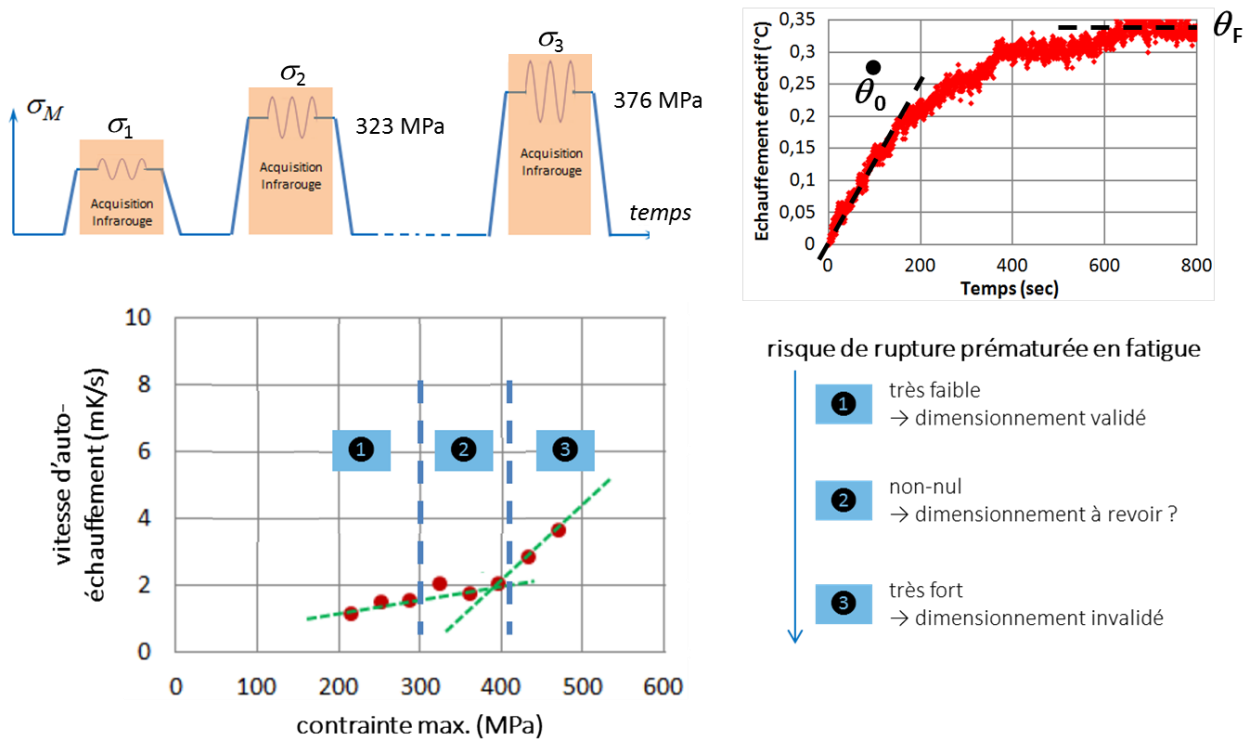


Fig. 2. Principe d'essais d'auto-échauffement et de leur utilisation pour la prévision de la tenue en fatigue

Cette technique prometteuse peut permettre une caractérisation rapide de la tenue en fatigue sur éprouvettes comme sur pièces industrielles et donc réduire drastiquement les coûts expérimentaux associés quand ceux-là ne sont pas justifiés.

5. Les méthodes d'analyse des essais de fatigue sur composites

Au cours des quatre dernières décennies, de nombreux travaux expérimentaux ont été menés sur des composites renforcés de fibres et des bases de données en fatigue très complètes ont été construites, notamment en ce qui concerne les applications éoliennes [8]. Parallèlement à ces travaux expérimentaux, des méthodes d'analyse et des modèles théoriques ont été développés pour prévoir l'accumulation des dommages et la durée de vie en fatigue de composite renforcé de fibres longues pour différents types de fibres, de matrices et d'architectures fibreuses dans des conditions de charge variant de la charge à amplitude constante aux chargements spectraux.

Une caractéristique inhérente aux composites qui doit être prise en compte est la variabilité des données de résistance et de durée de vie en fatigue. Cette variabilité est supérieure à celle observée dans les métaux. Des méthodes spécifiques d'analyse des essais de fatigue ont été développées en particulier en introduisant des notions statistiques [9-10-11] pour prendre en compte la dispersion forte observée sur ces essais. De notre côté, nous avons modifié le modèle proposé par Sendeckyj [11-12] en introduisant une limite de fatigue. Le point de départ de ce modèle est l'équation différentielle suivante qui donne l'évolution de la résistance résiduelle du matériau :

$$\frac{d\sigma^{res}(N)}{dN} = -\frac{1}{\gamma} c \cdot (\sigma_{app} - \sigma_{\infty})^{\gamma} \cdot (\sigma^{res}(N) - \sigma_{\infty})^{1-\gamma} \quad (\text{Eq. 1})$$

avec σ_{res} , σ_{app} , σ_{∞} respectivement la résistance résiduelle, la contrainte max appliquée et la limite de fatigue. La courbe représentant l'évolution de la résistance résiduelle s'obtient par intégration avec σ_{ult} correspondant à la résistance (statique) initiale :

$$\sigma^{res}(N) = ((\sigma_{ult} - \sigma_{\infty})^{\gamma} - c \cdot (N - 1) \cdot (\sigma_{app} - \sigma_{\infty})^{\gamma})^{\frac{1}{\gamma}} + \sigma_{\infty} \quad (\text{Eq. 2})$$

On en déduit facilement l'équation donnant la courbe de Wöhler (en considérant que $\sigma_{res} = \sigma_{app}$ au moment de la rupture) :

$$N_R = 1 + \frac{1}{c} \left(\left(\frac{\sigma_{ult} - \sigma_{\infty}}{\sigma_{app} - \sigma_{\infty}} \right)^{\gamma} - 1 \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

A partir de ce modèle, nous avons développé des méthodes d'analyses statistiques (Fig. 3) permettant de traiter les essais de fatigue. En particulier, les traitements probabilistes que nous avons développés récemment permettent d'obtenir les courbes « admissibles » (courbes à 95% par exemple) qui peuvent être utilisées en bureau d'études pour définir les valeurs de contraintes utilisables dans les calculs de dimensionnement.

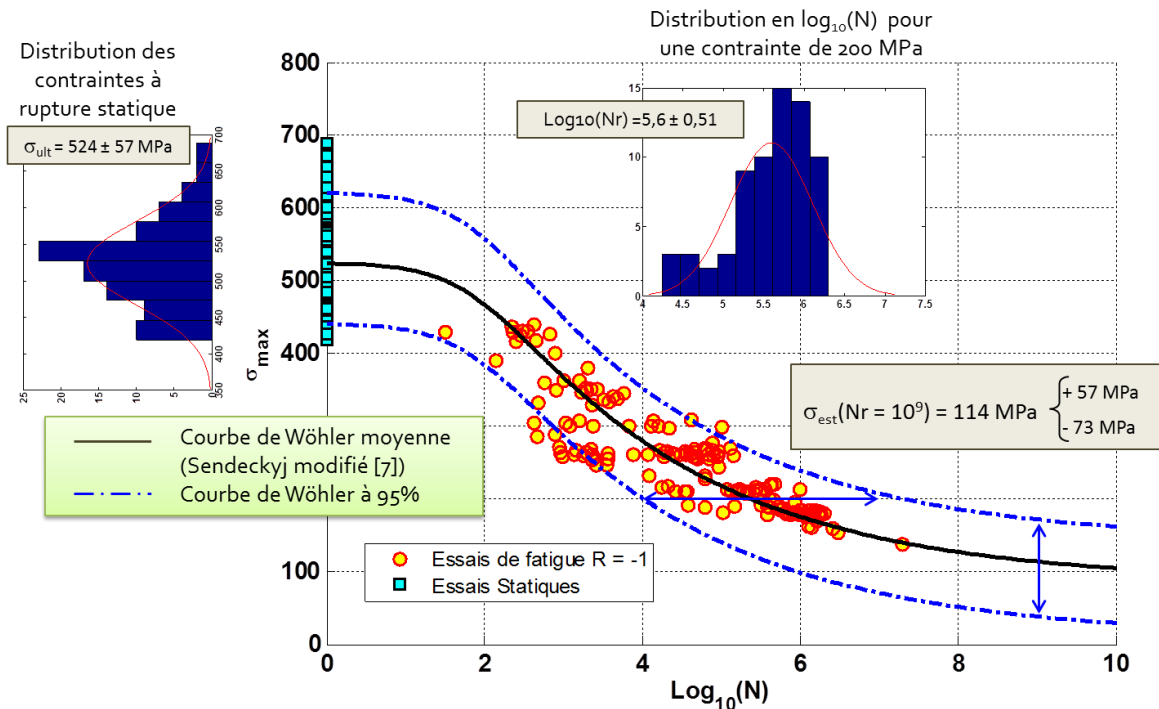


Fig. 3 Analyse statistique sur des essais statiques et de fatigue à R = -1 sur UD 0° Verre/résine (base Optidat)

Il est possible de pousser ces analyses afin d'intégrer dans les analyses statistiques à la fois les informations sur les grandeurs statiques, sur les essais de fatigue et les essais de résistances résiduelles (

Fig. 4).

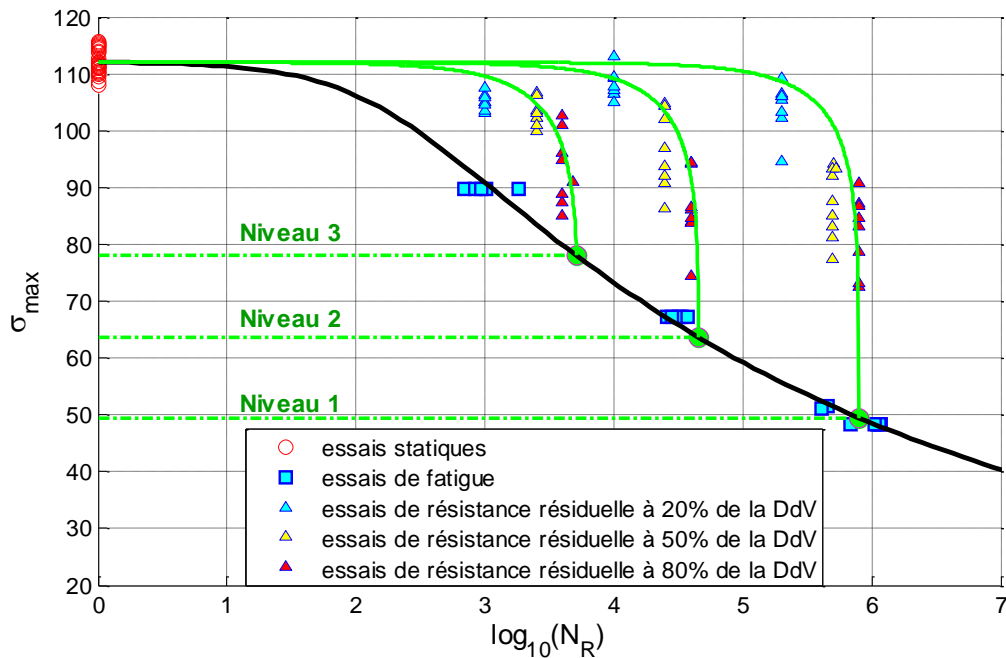


Fig. 4 Analyse par le modèle de Sendeckyj-modifié des courbes de durée de vie et de résistances résiduelles sur des essais statiques et de fatigue à $R = 0.1$ sur stratifié $[\pm 45^\circ]$ en Verre/résine (base Optidat)

Au-delà des courbes de Durée de Vie, il est souvent utile [10] de pouvoir tracer des diagrammes de type « Constant fatigue life diagram » (par exemple les diagrammes iso-durée de vie de Haigh ou de Goodman). Nous proposons une méthode spécifique dont le principe est expliqué sur la Fig. 5. Cette méthode consiste dans un premier temps à obtenir une courbe maîtresse par une technique de type « Walker » qui consiste à définir une contrainte équivalent de la manière suivante :

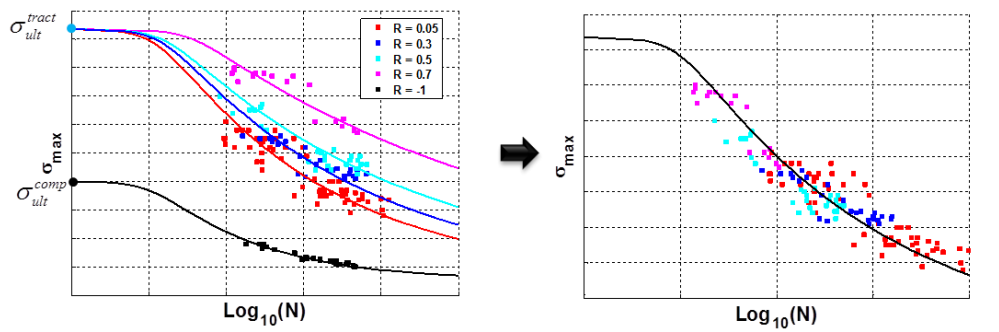
$$\begin{cases} \text{si } R < 0 & \sigma_{\max}(R) = \sigma_{\max}^{(R=0)} \cdot (1 - R)^{\gamma_t} \\ \text{si } R \geq 0 & \sigma_{\max}(R) = \sigma_{\max}^{(R=0)} \cdot (1 - R)^{\gamma_c} \end{cases} \quad (\text{Eq. 4})$$

où R est le rapport de charge et γ un coefficient obtenu par optimisation (minimisation de l'écart au modèle de Sendeckyj-modifié). A partir de l'Eq. 3, il est possible de déterminer la réponse pour n'importe quel rapport de charge et de reconstruire, comme indiqué sur la Fig. 5, les deux parties (traction et compression) du diagramme de Haigh.

6. Mécanismes de dégradation et modélisation

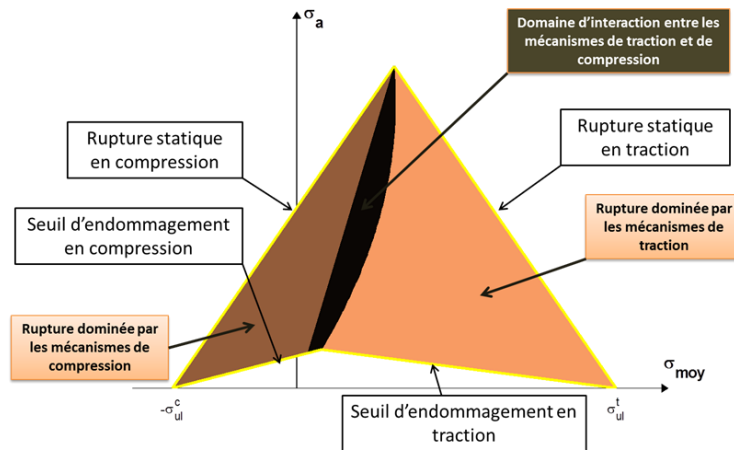
Afin de développer des modèles de fatigue pour les composites et d'optimiser la conception et la sélection des matériaux, il est d'abord nécessaire de bien comprendre les mécanismes de dégradation et les modes de défaillance pour proposer des modèles adaptés aux stratifiés classiques ou aux structures composites tissées. Il est à noter que la compréhension et la modélisation des mécanismes progressifs des dégradations [13] peuvent aider à l'analyse de ces essais de fatigue.

En règle générale, la défaillance des composites soumis à une charge statique est due à la combinaison de divers mécanismes qui interagissent et aboutissent à la rupture finale. Dans le cas de stratifiés d'unidirectionnels comme dans les composites tissés, le point de départ est des micro-défauts en particulier des décohésions entre la fibre et la matrice puis progressivement d'autres types de dégradation se mettent en place : la fissuration de la matrice, la rupture de fibres, le délaminage (dans les stratifiés).



1) Essais de fatigue pour différents rapports de charge

2) Construction de la courbe maîtresse



3) Construction du diagramme de Haigh

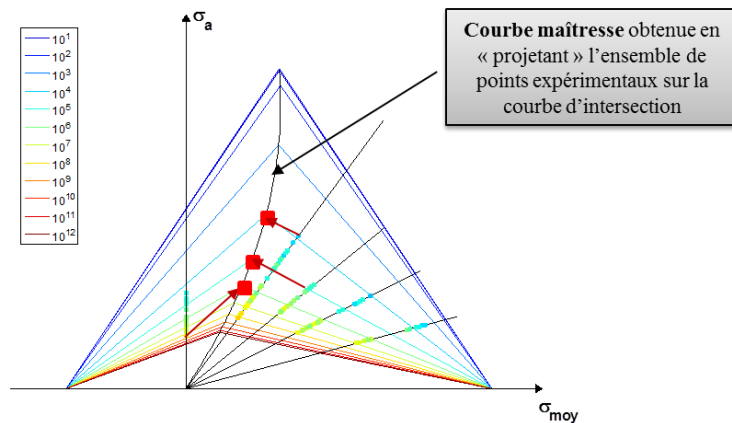


Fig. 5 Principe proposé pour la construction du diagramme de Haigh

Dans le cas de la fatigue, les mécanismes sont très comparables. La première phase qui peut être significative dans le cas des chargements relativement faibles est caractérisée par la formation d’une multitude de fissures ou de décohésions microscopiques. Il se produit alors une légère baisse de la rigidité liée à la formation de ces dommages. Ensuite, il y a une deuxième étape de dégradation qui est liée à la coalescence de ces défauts sous forme de fissuration matricielle où la rigidité diminue progressivement. Des dommages plus graves apparaissent au troisième stade, tels que des ruptures de fibres et la croissance instable du délaminage, conduisant finalement à une défaillance catastrophique. Il a noté que dans le cas de composites unidirectionnels à 0° (ou dans les plis à 0° dans un stratifié), il apparaît également des ruptures isolées et prématurées de quelques fibres (les

plus faibles ou les plus « tendues ») puis au niveau de ces ruptures se développe des endommagements en particulier des décohésions fibre/matrice [3].

Dans le cas des composites à renfort tissé ou tressé, la différence majeure réside dans des directions de défauts plus complexes car les défauts suivent l'ondulation du tissu mais ces défauts restent de même nature (microfissurations, fissures intra-fils transversaux, décohésions entre les fils de chaîne et de trame, ruptures isolées de fibres dans les fils longitudinaux et enfin rupture des fils). Il est probable (mais très peu étudié) qu'une différence majeure entre stratifiés d'UD et composites tissés réside dans le comportement en fatigue sous sollicitation hors-plan.

Dans les tissés comme pour le stratifié d'UD, les mécanismes observés sur les composites à matrice organique sont très comparables entre chargements statique et de fatigue.

Les coûts expérimentaux pour couvrir toutes les configurations d'essais nécessaires à l'étude exhaustive de la fatigue ne sont pas acceptables. Afin de réduire le nombre d'essais permettant de prévoir le comportement et la rupture par fatigue des composites, une modélisation en fatigue du composite est indispensable. Degrieck et Van Paepegem [10], propose une classification des approches de modélisation existantes pour le comportement en fatigue des polymères renforcés de fibres et donne un aperçu complet des stratégies de modélisation les plus importantes pour le comportement en fatigue. Ces auteurs justifient leur classification par le grand nombre de modèles de fatigue existants pour les composites qui divisent en trois catégories :

- a) Les modèles de durée de vie en fatigue (modèles empiriques / semi-empiriques) qui sont utilisés pour construire les courbes S-N ou des diagrammes iso-durée de vie.
- b) Les modèles phénoménologiques de rigidité / résistance résiduelle.
- c) Les modèles d'endommagement qui utilisent une ou plusieurs variables de dommages liées à des observations ou à des effets mesurables des dommages (fissures de matrice transversale, délaminage).

Les modèles empiriques ou semi empiriques déterminent la durée de vie en fatigue du composite en se basant uniquement sur une condition de charge constante. Ces modèles sont très nombreux et ne prennent pas en compte les mécanismes de dégradation spécifiques. Ils sont surtout difficiles à étendre vers des conditions plus générales de chargements (multiaxiaux ou non constants).

Les modèles phénoménologiques décrivent le comportement en fatigue du composite avec l'évolution des propriétés macroscopiques telles que la rigidité et la résistance. La perte de ces propriétés macroscopiques est généralement décrite à travers des variables phénoménologiques, souvent appelées «variables de dommage», mais ces variables de dommage ne sont pas basées sur les mécanismes de dommage réels, comme c'est le cas pour les modèles d'endommagement. Les modèles de résistance résiduelle ne tiennent pas compte de l'historique de chargement, c'est-à-dire le cumul des états de dommages successifs ou la redistribution des contraintes dans le cas d'un calcul de structures. Les modèles de rigidité résiduelle permettent de suivre les variations de propriétés élastiques du matériau mais pour prévoir la durée de vie, il est également nécessaire d'y associer un critère de rupture avec ces évolutions éventuelles. Il est à noter que la rigidité résiduelle présente une dispersion statistique beaucoup moins grande que la résistance résiduelle.

Les modèles d'endommagement sont considérés comme les plus prometteurs, car ils expliquent quantitativement l'accumulation de dommages et la redistribution des contraintes dans la structure composite. Ces modèles corréleront la croissance des dommages avec les propriétés mécaniques résiduelles (rigidité et résistance) généralement en utilisant le cadre usuel de la mécanique continue de l'endommagement ([13] ou [15] par exemple).

L'équipe MC² (Modélisation et Caractérisation Mécaniques des Composites) de l'ONERA développe depuis plus d'une dizaine d'années des modèles d'endommagement en fatigue pour des matériaux stratifiés d'UD ([3]), pour les CMO tissés 3D avec Safran ([17,18]) et même pour les Composites à Matrice Céramique ([19]). A chaque fois, le point de départ de ces modèles est une extension d'un modèle d'endommagement statique en fatigue en supposant d'une part que les mécanismes sont les mêmes et d'autre part une séparation des cinétiques de dommages en une partie statique et une partie fatigue. A partir du modèle statique, deux versions sont spécifiquement proposés pour la fatigue, la première dite « en cycle » permet de prévoir le comportement en fatigue pour des chargements multiaxiaux à amplitude constante, l'autre dite « incrémentale » permet de prendre en compte tous les chargements y compris les chargements spectraux (Fig. 6).

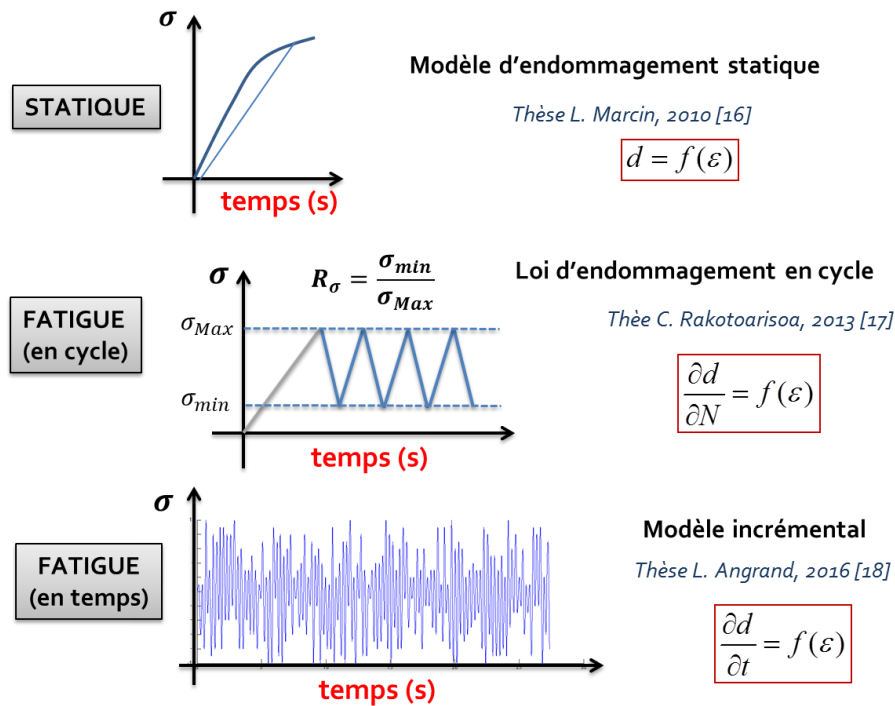


Fig. 6. Les différents travaux de thèse sur la modélisation de la fatigue menés à l'ONERA

L'ensemble de ces modèles a été implémenté dans un code par éléments finis (ZeBuLoN) et un soin particulier a été apporté à leur implémentation et des stratégies de calcul dédiées ont été développées afin d'avoir des coûts raisonnables même lors de la simulation de chargements complexes et de longue durée sur structures.

7. Conclusions

Mais comme mentionné dans [20], il est difficile d'obtenir une approche générale du comportement en fatigue des matériaux composites. L'objectif de cet article est de décrire les difficultés rencontrées dans l'analyse des résultats de fatigue sur composites ainsi que donner un aperçu rapide des travaux récents de l'ONERA dans ce domaine.

Les méthodes d'essais de fatigue et les techniques d'instrumentation associées ont été adaptées aux composites en particulier pour permettre le suivi des dommages causés durant les cycles (inspection visuelle, microscopie électronique à balayage, microscopie électronique à balayage, ultrasons, thermographie, tomographie 3D à rayons X, etc.). Les deux grands défis actuels concernant les essais de fatigue des composites sont (i) l'amélioration des méthodes d'essai et d'instrumentation (EA, mesures de champs, thermographies,...) et (ii) le défi d'une évaluation plus rapide des performances en fatigue.

Le challenge principal au niveau des méthodes d'analyse des résultats de fatigue est la prise en compte de la variabilité des données de résistance et de durée de vie en fatigue. Le but est à terme d'utiliser des démarches statistiques ou fiabilistes pour remplacer les méthodes par « abattement » et facteur de sécurité actuellement utilisées pour la certification des pièces composites. Enfin, pour aller jusqu'au bout de la démarche, il est nécessaire de disposer de méthodes de calculs de structures en fatigue qui soient acceptables en temps de calcul et fiables en termes de résultats c'est-à-dire pour lesquelles il existe un niveau de confiance suffisant et validé. Cela constitue une part importante des travaux en cours à l'ONERA sur la fatigue des composites.

Remerciements

Cet article repose en particulier sur les travaux de thèse récents de Laura Muller et Fabrizio Pagano réalisés au Département Matériaux et Structures de l'ONERA ainsi que sur la base de données publique du projet « OPTIMAT BLADES » [8]. Les auteurs remercient particulièrement le CETIM pour leur collaboration et leur aide dans les travaux sur la fatigue des composites ainsi que Rodrigue Desmorat du LMT-Cachan pour sa collaboration dans le développement de modèles incrémentaux.

Références

- [1] B. Harris, « *Fatigue in composite* », in Composites Science and Engineering, Woodhead Publishing, 2003.
- [2] W. Van Paepegem, « *Fatigue Testing Methods for Polymer Matrix Composites* », Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites, Woodhead Publishing, 2011.
- [3] F. Pagano, P. Paulmier, M. Kaminski, Alain Thionnet, « *Numerical and experimental approach for improving quasi-static and fatigue testing of a unidirectional CFRP composite laminate* », in Procedia Eng., 213, 2018.
- [4] S. Blassiau, « *Modélisation des phénomènes microstructuraux au sein d'un composite unidirectionnel carbone/epoxy et prédiction de durée de vie : contrôle et qualification de réservoirs bobines* », thèse de Doctorat de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005.
- [5] L. Jegou, Y. Marco, V. Le Saux, and S. Calloch, « *Fast prediction of the Wöhler curve from heat build-up measurements on Short Fiber Reinforced Plastic* », Int. J. Fatigue, vol. 47, pp. 259–267, 2013.
- [6] L. Gornet, O. Westphal, A. Krasnobrizha, P. Rozycki, C. Peyrac, and F. Lefèbvre, « *Rapid determination of the high cycle fatigue limit of a woven carbon fibre thermoplastic matrix* », JNC 19, 2015.
- [7] L. Muller, JM. Roche, A. Hurmane, C. Peyrac, L. Gornet « *Experimental monitoring of the self-heating properties of thermoplastic composite materials* », 7th International Conference on Fatigue Design, Senlis, 2018.
- [8] Optimat Blades Project (EU-Project 2002-2006) : <https://wmc.eu/optimatblades.php>
- [9] F. Dau, A. Alzina, L. Guillaumat, « *Uncertainties propagations of composite mechanical properties from micro to macro scale* », in Proceedings of the 13th European Conf. on Composite Materials (ECCM13), Stockholm, 2008.
- [10] AP. Vassilopoulos, « *Fatigue life prediction of composites and composite structures* », in Materials, Woodhead Publishing, 2010.
- [11] GP. Sendeckyj « *Fitting Models to Composite Materials Fatigue Data* », American Society for Testing and Materials, ASTM STP 734, 1981.
- [12] GP. Sendeckyj « *Life Prediction for Resin-Matrix Composite Materials* », in Fatigue of Composite Materials edited by K.L. Reifsnider, 1990.
- [13] C. Hochard, J. Payan, C. Bordreuil, « *A progressive first ply failure model for woven ply CFRP laminates under static and fatigue loads* », 28, 1270-1276, 2006.
- [14] J. Degrieck, W. Van Paepegem, « *Fatigue damage modeling of fibre-reinforced composite materials: Review* », Applied Mechanics Reviews, 54, 279-300, 2001.
- [15] A. Thionnet, J. Renard, « *Laminated composites under fatigue loading: a damage development law for transverse cracking* », Composites Science and Technology, 52, 173-181, 1994.
- [16] L. Marcin. « *Modélisation du comportement, de l'endommagement, et de la rupture des matériaux composites à renforts tissés pour le dimensionnement robuste de structures* », thèse ONERA-Université de Bordeaux, 2010.
- [17] C. Rakotoarisoa « *Prévision de la durée de vie en fatigue des composites à matrice organique tissés interlock* », thèse ONERA- Université de Technologie de Compiègne, 2013.
- [18] L. Angrand « *Lois d'endommagement incrémentales pour la prévision de la durée de vie des composites tissés* », thèse de doctorat Paris Saclay, 2016.
- [19] E. Hemon, « *Modèles multi-niveaux de prévision des durées de vie en fatigue des structures composites à matrice céramique pour usage en turbomachines aéronautiques* », thèse ONERA-Université de Bordeaux, 2013.
- [20] C. Bathias, « *An engineering point of view about fatigue of polymer matrix composite materials* », International Journal of Fatigue, 28, 1094-1099, 2006.