



**HAL**  
open science

# Effet de l'historique de chargement en fatigue pour la prédiction de la propagation de délaminage en mode I

Guillaume Androuin, Laurent Michel, Irène Maillet, Xiaojing Gong

► **To cite this version:**

Guillaume Androuin, Laurent Michel, Irène Maillet, Xiaojing Gong. Effet de l'historique de chargement en fatigue pour la prédiction de la propagation de délaminage en mode I. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01623264

**HAL Id: hal-01623264**

**<https://hal.science/hal-01623264v1>**

Submitted on 25 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.

# Effet de l'historique de chargement en fatigue pour la prédiction de la propagation de délaminage en mode I

## *Effect of fatigue load history on the prediction of crack growth under mode I loading*

Guillaume Androuin<sup>1</sup>, Laurent Michel<sup>1</sup>, Irène Maillet<sup>2</sup>, Xiaojing Gong<sup>3</sup>

1 : Groupe MSC, Institut Clément Ader  
Université de Toulouse, CNRS, ISAE-SUPAERO  
31077 TOULOUSE Cedex 4, France

e-mail : [guillaume.androuin@isae.fr](mailto:guillaume.androuin@isae.fr) , [laurent.michel@isae.fr](mailto:laurent.michel@isae.fr)

2 : DGA Techniques Aéronautiques  
47 rue Saint-Jean  
BP 93123 31131 Balma Cedex, France  
e-mail : [irene.maillet@intra.def.gouv.fr](mailto:irene.maillet@intra.def.gouv.fr)

3 : Groupe MSC, Institut Clément Ader  
Université de Toulouse, CNRS, UPS  
46500 Tarbes, France  
e-mail : [xiaojing.gong@iut-tarbes.fr](mailto:xiaojing.gong@iut-tarbes.fr)

### Résumé

Afin de développer une approche de tolérance aux dommages qui prenne en compte la propagation de délaminage dans les matériaux composites, l'effet du rapport de charge sur la propagation de délaminage en fatigue en mode I est étudié sur un composite carbone/époxyde. D'abord, des essais de propagation à rapport de charge et déplacement maximum constants permettent de tracer des courbes de propagation de référence pour les rapports de charge  $R = 0,1 ; 0,4 ; 0,6$ . De ces courbes est tirée une courbe de propagation maîtresse, indépendante du rapport de charge. Dans une seconde partie, la propagation de délaminage sous spectre de charge est étudiée. Des spectres de charge par blocs sont définis et la propagation est estimée à partir des courbes de référence et de la courbe de propagation maîtresse. Les effets de la variation du rapport de charge sur la vitesse de propagation du délaminage sont mis en évidence et discutés.

### Abstract

In order to develop a « slow-growth » approach for composite materials, the load ratio effect on fatigue delamination propagation in mode I is studied on a carbon/epoxy composite. First, delamination propagation tests with constants load ratio and maximum displacement are carried out. Reference curves are obtained from these tests for three load ratio values  $R = 0,1 ; 0,4 ; 0,6$ . In addition, a master propagation curve, independent of the load ratio, is plotted. In a second part, delamination propagation is studied under load spectrum. Spectra are made of several blocks, with different levels of load ratio or maximum displacement. Delamination propagation is estimated from reference curves and from the master propagation curve. The effect of the variation of the load ratio on crack growth rate is highlighted.

**Mots Clés :** Fatigue, composite, rapport de charge, délaminage

**Keywords :** Fatigue, composite, load ratio, delamination

## 1. Introduction

Dans le cadre de la tolérance aux dommages des structures aéronautiques, la certification avion publiée par la Federal Aviation Administration (FAA) précise : « The evaluation should demonstrate that the residual strength of the structure will reliably be equal to or greater than the strength required for the specified design loads (considered as ultimate), including environmental effects » [1]. Il s'agit donc dans un premier temps de connaître la taille critique de délaminage et dans un second temps de pouvoir prédire le temps nécessaire à ces défauts pour atteindre leur taille

critique lorsqu'ils sont soumis aux spectres de charge aéronautiques. C'est sur cette seconde étape que se concentrent ces travaux.

Dans le cadre de la tolérance aux dommages des structures métalliques, la propagation de défaut sous spectre de charge peut être prévue par une méthode de cumul des cycles « Rainflow » par exemple et la prise en compte des effets retards liés à l'apparition des surcharges dans l'historique du chargement [2]. En revanche, concernant la propagation de délaminage en fatigue dans les matériaux composites de type carbone/époxyde, l'applicabilité de telles approches est encore à étudier.

En effet, la manière dont les différents niveaux du spectre de chargement interagissent entre eux lors de la propagation n'est pas connue. En raison de leur structure stratifiée et fibreuse, l'endommagement créé en front de fissure des matériaux composites semble plus complexe que pour un matériau métallique. De même, la nature (morphologique : avec ou sans nodules, polymérique : thermodurcissable ou thermoplastique) de la matrice organique à l'inter-ply et dans le pli joue un rôle important sur la ténacité du stratifié. Les stratifiés (même unidirectionnels) peuvent ainsi présenter une interaction entre les différents niveaux de charge. Vérifier si un effet d'historique existe est donc essentiel dans le cadre de la prédiction de propagation de défaut.

Pour décrire la propagation du délaminage en fatigue, la loi de Paris est souvent formulée pour les composites comme suit (Eq. 1) :

$$\frac{da}{dN} = k \cdot \Delta G^n \quad (1)$$

où  $da/dN$  est la vitesse de propagation,  $\Delta G$  est l'amplitude de chargement et  $k$  et  $n$  les paramètres de la loi de Paris, déterminés empiriquement. Notons que le taux de restitution d'énergie  $G$  est proportionnel à la charge au carré, et cette loi ne tient pas compte de l'effet de la charge moyenne ni de la fréquence de sollicitation.

En effet, les principaux paramètres d'un spectre de charge sont la fréquence de sollicitation, la charge moyenne et l'amplitude de chargement. Cette dernière peut être aussi représentée par le rapport de charge  $R$ , défini comme le rapport de la charge minimale sur la charge maximale du cycle.

Un spectre de charges aéronautiques résulte d'un historique de chargement complexe (cycles du vol, rafales, vibrations aéroélastiques par exemple). Les paramètres du spectre peuvent donc varier grandement au cours du temps.

L'effet de la fréquence ayant été abordé précédemment [3], le présent travail se focalise sur l'effet qu'auraient le rapport de charge, et son historique de variation, sur la vitesse de propagation.

Dans la littérature, plusieurs auteurs ont décrit l'effet du rapport de charge sur la propagation de délaminage en fatigue en ayant pour objectif d'ajuster la définition de  $\Delta G$  afin de tracer une courbe de propagation qui ne dépende pas de  $R$ .

Sur un matériau composite carbone/époxyde, il est montré [3, 4, 5] que pour une valeur de  $\Delta G$  donnée, le rapport de charge  $R$  influence de façon significative la vitesse de propagation  $da/dN$ . Deux questions se posent : tout d'abord, puisque l'amplitude du taux de restitution d'énergie  $\Delta G$  est indépendante du rapport de charge  $R$ , comment pourrait-on prendre en compte les effets de la variation de chaque paramètre ? Deuxièmement, comment prévoir la vitesse de la propagation de défaut si les deux paramètres  $\Delta G$  et  $R$  varient en même temps ?

Contrairement à la définition  $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{min}$ , utilisée pour les matériaux métalliques pour décrire l'effet du rapport de charge, la définition  $\Delta G = G_{max} - G_{min}$  créée par analogie ne rend pas compte de l'effet du rapport de charge. La raison est que le principe de similitude n'est pas respecté et que le rapport de charge est alors défini comme un rapport du taux de restitution d'énergie  $R = \frac{G_{min}}{G_{max}}$  et non comme un rapport d'efforts, tel que c'est le cas pour  $\Delta K_{eff}$ .

La définition de Rans [5] (Eq. 2) rétablit ceci en posant  $R = \sqrt{\frac{G_{min}}{G_{max}}}$ .

$$\Delta G_{eff} = (\sqrt{G_{max}} - \sqrt{G_{min}})^2 \quad (2)$$

Reprise par Maillet [3] en mode II, cette définition devient  $\Delta G_{eff} = G_{max}(1 - R)^2$ .

Un effet du rapport de chargement  $R$  sur  $da/dN$  cité dans la littérature peut être relié au phénomène de l'augmentation de la résistance au délaminage en fonction de la croissance de la fissure, appelé la courbe- $R$ . Pour un composite carbone/époxyde unidirectionnel en mode I délaminage, Yao et ses co-auteurs [6] ont constaté que les faciès de rupture formés lors de la propagation présentent des reliefs plus marqués à rapport de chargement  $R$  élevé, ce qui augmente la résistance à la propagation et en diminue donc la vitesse de propagation.

Si l'on trace une courbe de la variation de la vitesse de la propagation en fonction de  $\Delta G_{eff}$  de la façon suivante :  $\text{Log}(da/dN) = \text{Log}(\Delta G_{eff})$ , la courbe de propagation est une droite, ce qui signifie que la loi de Paris (Eq.1) est applicable. Par contre, ces droites sont très décalées les unes des autres pour différentes valeurs de  $R$ , en étant tout de même quasiment parallèle. Cela signifie que la constante  $n$  dans la loi de Paris (Eq. 1) devrait être identique. Ainsi, la construction d'une courbe maîtresse de propagation, indépendante du rapport de charge, est possible en introduisant un paramètre de « décalage » des courbes,  $\Upsilon$ , selon l'équation 3 [3].

$$\Delta G_{eq} = G_{max}(1 - R)^{2(1-\Upsilon)} \quad (3)$$

Afin d'étudier l'effet du rapport de charge sur la propagation de délaminage, la première partie de cette étude porte sur la construction d'une courbe maîtresse de propagation en fatigue en mode I pour le matériau étudié. Pour ceci, trois rapports de charge sont considérés et permettent de déterminer le paramètre de décalage  $\Upsilon$ .

La deuxième partie porte sur la propagation de délaminage sous spectre de charge complexe. Les résultats expérimentaux permettent de démontrer l'importance de l'effet de l'historique de chargement. En s'appuyant sur la loi maîtresse de Paris obtenue dans la première partie de cette étude, une prédiction de la propagation de délaminage est effectuée. Le but est de savoir si la définition  $\Delta G_{eq}$  est suffisamment correcte pour prendre en compte l'effet de l'historique de chargement s'il y en a un.

## 2. Travaux expérimentaux

### 2.1 Éprouvettes d'essai

Les éprouvettes sont découpées à partir de plaques de  $400 \times 300 \text{ mm}^2$ , réalisées par drapage de 20 plis de T700/M21 pré-imprégnés de façon unidirectionnelle. Celles-ci sont ensuite polymérisées sous autoclave suivant le cycle de cuisson recommandé par le fabricant.

Les éprouvettes ont pour dimensions  $180 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$  (longueur, largeur, épaisseur). Un insert de téflon est placé dans le plan médian pour créer un défaut de taille initiale égale à  $40 \text{ mm}$ .

Des talons dont les dimensions respectent la norme ASTM D5528, sont fixés sur les deux bords du délaminage afin de solliciter l'éprouvette en mode I. Une jauge de fissure S100 fournie par RUMUL est ensuite collée sur la tranche de l'éprouvette et connectée à un Fractomat qui fournit une mesure de la longueur de délaminage en temps réel.

Toutes les éprouvettes sont pré-fissurées en statique afin d'amorcer le délaminage sur au moins  $2 \text{ mm}$ .

## 2.2 Moyen d'essais

Les essais de fatigue sont réalisés sur machine hydraulique à une fréquence de  $10\text{Hz}$ , équipée d'une cellule d'efforts de capacité  $200\text{N}$ . Les essais sont effectués à déplacement imposé.

## 2.3 Traitement des données

Le taux de restitution d'énergie est calculé par la méthode de la complaisance. Elle est exprimée sous la forme  $C = C_0 * a^m$  pour chaque éprouvette.

$G$  se calcule ensuite avec  $G_{\max} = \frac{m\delta_{\max}^2}{2bC_0a^{m+1}}$ , où  $\delta_{\max}$  est le déplacement maximum atteint

lors du cycle,  $b$  est la largeur de l'éprouvette,  $a$  la longueur de délaminage et,  $m$  et  $C_0$  les paramètres de complaisance, déterminés antérieurement.

La vitesse de propagation  $da/dN$  est calculée à l'aide de la méthode polynomiale 7-points de la norme ASTM E647. Lorsque les données de mesure de fissure le nécessitent, un lissage est effectué par moyenne glissante sur 400 points.

## 3. Résultats et discussion

### 3.1 Effets du rapport de charge sur les courbes de propagation en fatigue

Des essais de fatigue à rapport de charge constant  $R = 0,1 ; 0,4 ; 0,6$  ont été réalisés, à raison de trois éprouvettes par rapport de charge. En fixant le déplacement maximum comme condition d'essai, les niveaux de taux de restitution d'énergie et la vitesse de propagation diminuent avec l'avancée de la fissure au cours de l'essai. En effet, la propagation de délaminage induit la formation de pontages de fibres durant l'essai, ce qui augmente la résistance à la propagation et diminuent donc la vitesse de propagation.

Les courbes de propagation obtenues pour les 3 rapports de charge sont représentées ci-après (*Fig. 1*), où la variation de la vitesse  $da/dN$  est tracée en fonction en fonction de  $G_{\max}$  pour un  $R$  donné. Il est montré que quelque soit la valeur de  $R$ ,  $\text{Log}(da/dN)$  varie de façon linéaire avec  $\text{Log}(G_{\max})$ . De plus, ces droites se décalent vers des vitesses plus faibles lorsque le rapport de chargement  $R$  augmente.

Ces observations sont cohérentes avec les résultats de la littérature de Yao [7]. Le rapport de charge plus élevé favorise la création de pontage de fibres.. Cependant, en analysant les faciès de rupture, aucune différence notable n'a été observée entre les rapports de charge  $R=0,4$  et  $R=0,6$ . Il semble qu'un état limite d'endommagement existe et qu'il est le même pour les deux rapports de charge, ce qui mène aux mêmes courbes de propagation.

De plus, ces droites sont pratiquement parallèles, ce qui conduit à penser que ces résultats peuvent être interpolés avec une unique constante  $n$  de la loi Paris pour tous les rapports de charge. En revanche, le paramètre  $k$  de la loi Paris semble dépendant du rapport  $R$ .  $k$  de  $n$  sont ainsi déterminés par la méthode des moindres carrés lors du post-traitement.

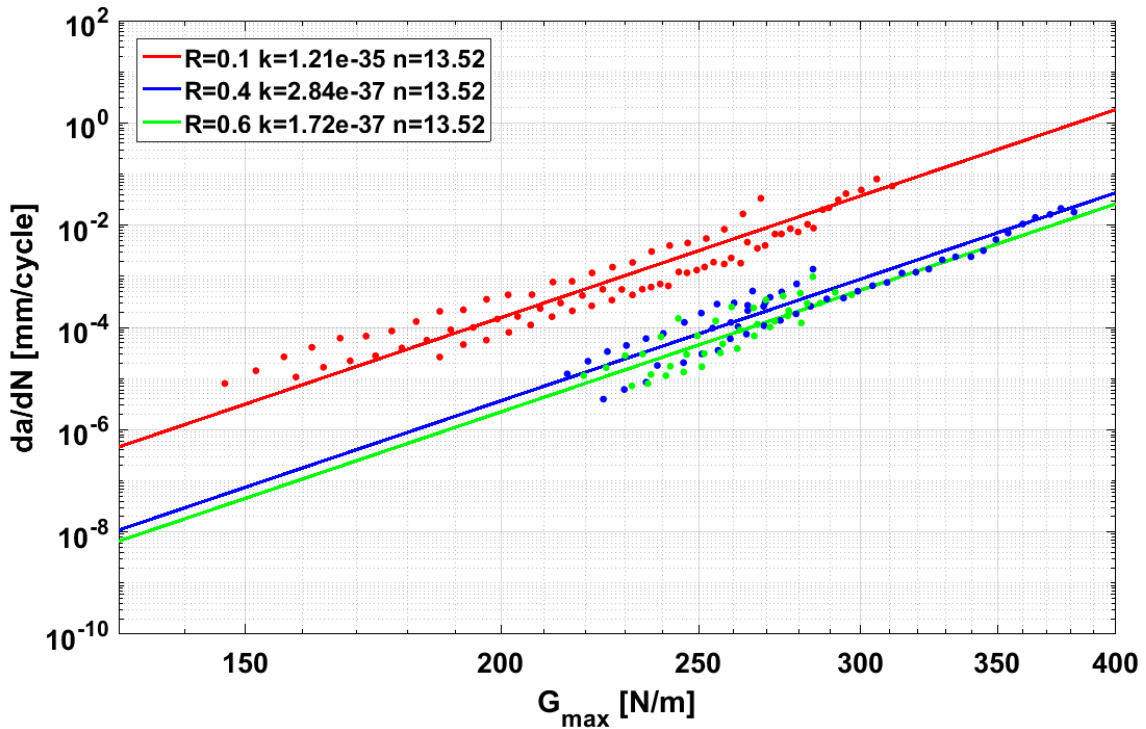


Fig. 1. Variations de la vitesse de propagation de délaminage en fatigue en mode I  $da/dN$  en fonction de  $G_{max}$  pour les rapports de charge  $R=0,1 ; 0,4 ; 0,6$

Comme vu précédemment, la définition de  $\Delta G_{eq}$  (Eq.3) est utilisée comme la force motrice de fissure afin de construire la courbe maîtresse de propagation (Fig. 2). La valeur de  $\gamma$  est déterminée par la méthode des moindres carrés appliquée aux coefficients  $k$  des courbes de propagation à  $R = 0,1 ; 0,4 ; 0,6$ . Les coefficients obtenus pour la courbe maîtresse sont  $k = 1,53e^{-35}$ ,  $n = 13,52$  et  $\gamma = 0,81$ .

En tenant compte de la dispersion des essais, l'effet de  $R$  est correctement intégré par la définition de la force motrice de fissure  $\Delta G_{eq}$ .

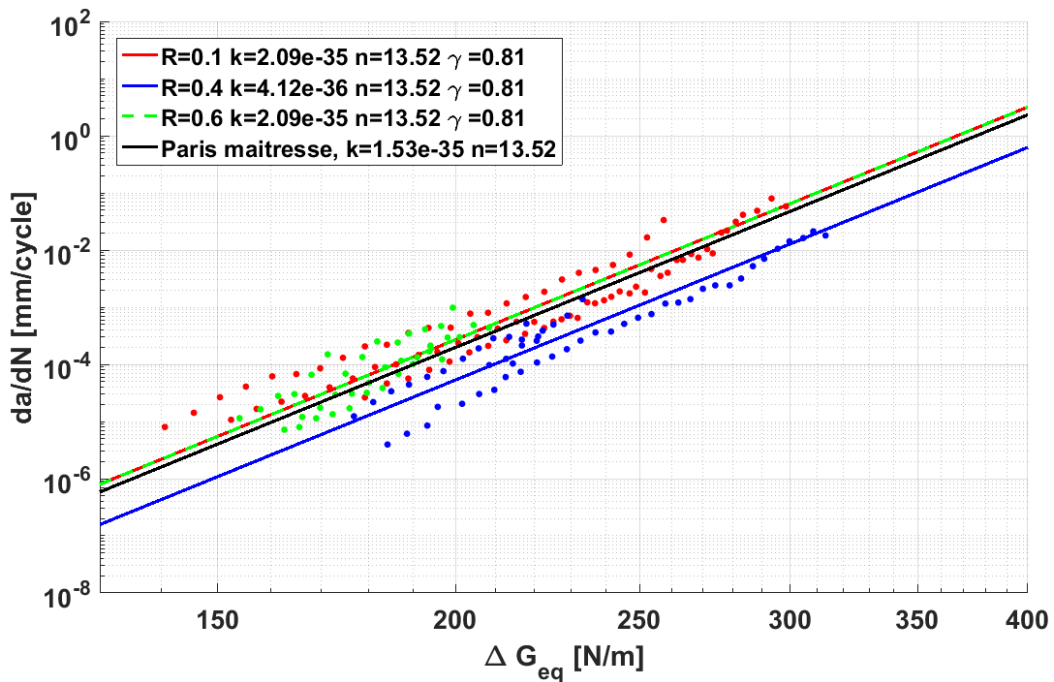


Fig. 2. Variation de la vitesse de propagation de délaminage en fatigue en mode I  $da/dN$  en fonction de  $\Delta G_{eq}$  pour les rapports de charge  $R=0,1 ; 0,4 ; 0,6$

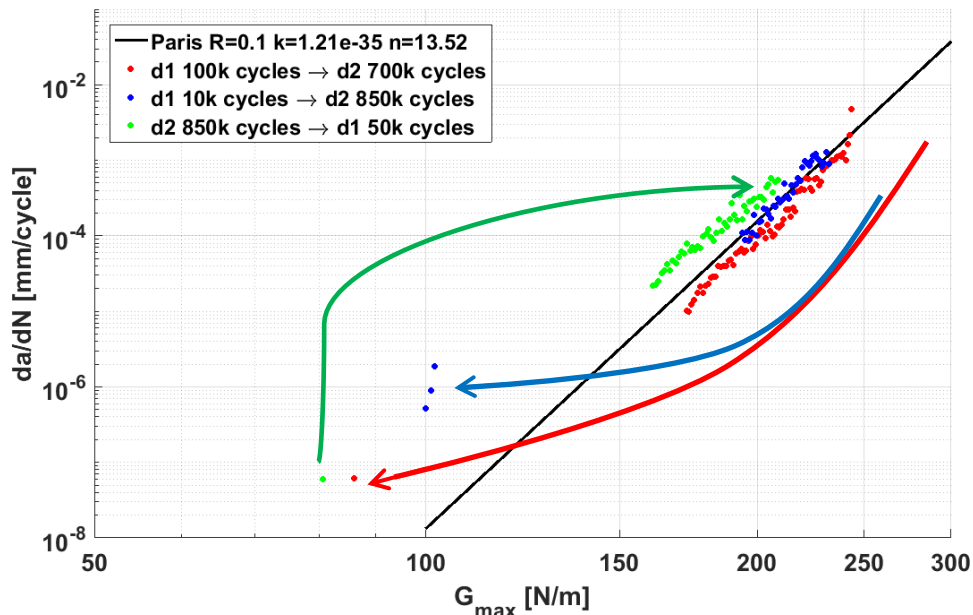
### 3.2 Spectres de charge

Dans cette partie, des spectres de charges à niveau variable sont considérés. Ils ont pour but d'étudier l'effet de la variation du rapport de charge et du déplacement maximum au cours d'un essai de fatigue. Deux types de spectres de charge sont utilisés : dans le premier, le rapport de charge est constant tandis que le déplacement maximum varie ; dans le second, le rapport de charge varie pour un déplacement maximum constant. Les effets de ces variations sont observés sur la vitesse de propagation qui est comparée à celle des droites de propagation de référence de la première partie (*Fig. 1* et/ou *Fig. 2*).

#### 3.2.1 Spectre de charge à $R$ constant et à deux niveaux de $d_{max}$

Le rapport de charge est fixé à  $R=0,1$ . Deux niveaux de déplacement maximum  $d_1$  et  $d_2$  sont considérés. Ils sont déterminés de façon à ce que  $d_1$  et  $d_2$  correspondent à un pourcentage du taux de restitution d'énergie critique en considérant la taille de fissure initiale. Respectivement ici à un taux de restitution d'énergie maximal initial  $G_{1-initial} = 0,8 * G_c$  et  $G_{2-initial} = 0,4 * G_c$ , où  $G_c$  est la ténacité du matériau statique en mode I. De ce fait  $d_1 > d_2$ .

D'abord, des essais à deux blocs ont été menés. La totalité des cycles est divisée en deux blocs, l'un à  $d_1$ , l'autre à  $d_2$ . Les résultats de ces essais sont représentés ci-dessous (*Fig. 3*).



*Fig. 3. Courbes de propagation pour un spectre composé de deux blocs à  $d_{max}$  différents*

La droite noire représente les essais effectués sous spectre simple à  $R=0,1$ . Elle permet de situer les courbes de propagation des spectres par rapport aux essais sous spectre simple (*Fig. 1*).

Deux éprouvettes sont testées de manière à avoir un bloc à déplacement maximum  $d_1$  en premier et une autre de manière à avoir un bloc à déplacement maximum  $d_2$  en premier (*voir légende*).

Que le premier bloc soit celui à haut niveau ( $d_1$ ) ou à bas niveau ( $d_2$ ), les vitesses observées pour le bloc à bas niveau sont bien supérieures à celle de la droite de Paris obtenue précédemment pour  $R=0,1$  (*Fig. 1*). Cet écart pourrait être dû à une différence de l'état d'endommagement de l'éprouvette entre spectre simple et spectre complexe.

L'endommagement créé lors d'un spectre simple n'est pas retrouvé lors de spectres complexes par blocs car il y a un saut de niveau lors du passage d'un bloc à l'autre. La résistance à la propagation qui aurait dû être créée par les pontages de fibres n'est pas présente et la vitesse de propagation s'en trouve augmentée.

Afin de compléter cette étude, des spectres complexes comportant plusieurs blocs de chaque niveau ont été utilisés. Les détails des spectres de charge et les courbes de propagation obtenues sont représentées ci-dessous (Fig. 4).

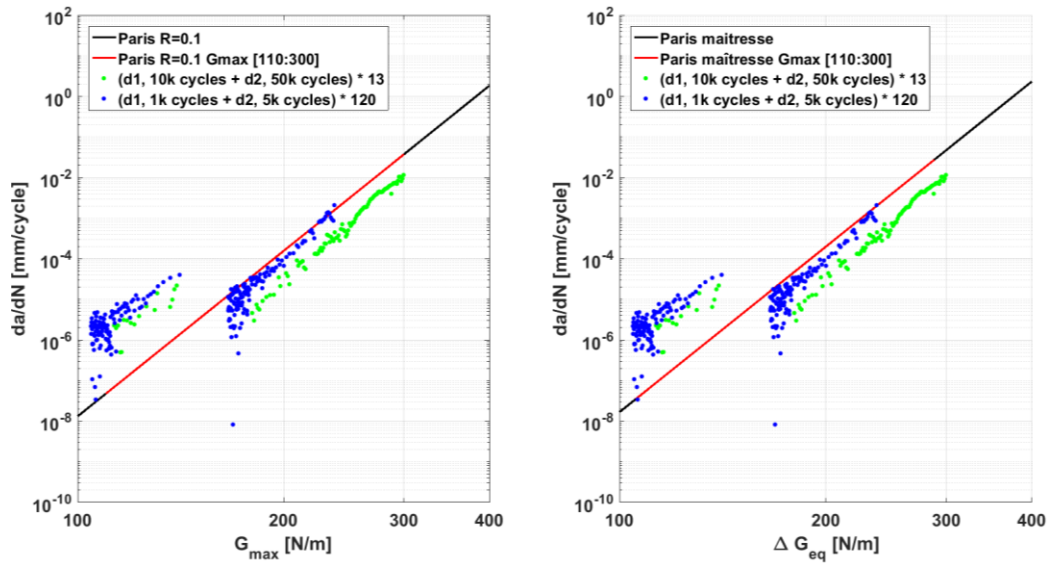


Fig. 4. Courbes de propagation pour un spectre complexe alternant des blocs à  $d_1$  et des blocs à  $d_2$  en fonction de  $G_{max}$  avec la droite de référence  $R=0,1$  (gauche) et  $\Delta G_{eq}$  avec la courbe maîtresse de propagation (droite)

Tout comme pour les essais à deux blocs, les phases correspondantes aux bas niveaux de déplacement présentent des vitesses supérieures à celle de la droite de Paris sous spectre simple. La vitesse de propagation du délaminage n'est pas ralentie pour les bas niveaux. Comme pour les essais à deux blocs, l'endommagement qui aurait dû être construit n'est pas présent à cause du saut de niveau.

En s'appuyant sur les coefficients de Paris de la droite de référence à  $R=0,1$  et ceux de la courbe maîtresse, la propagation du délaminage peut être estimée (Fig. 5).

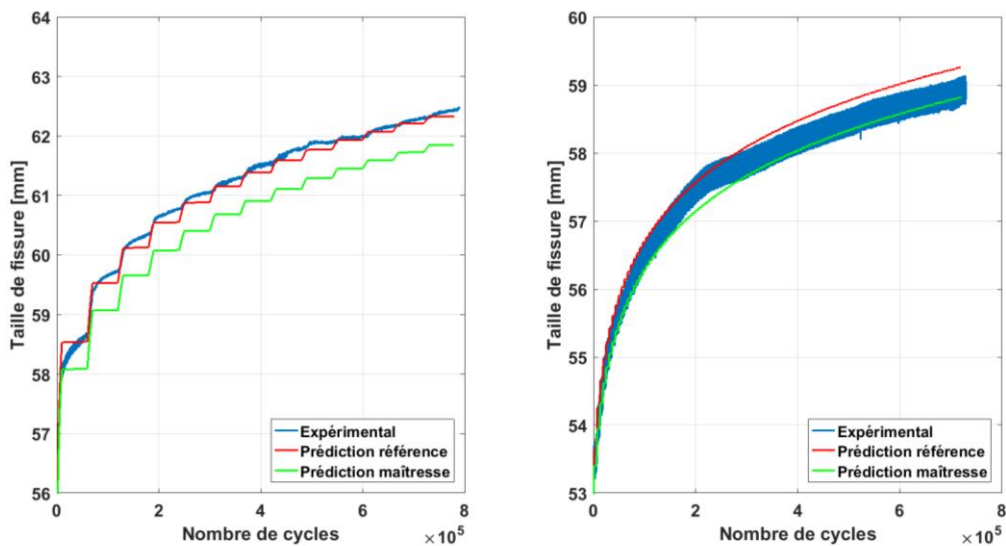


Fig. 5. Prédiction de la propagation du délaminage sous spectre de charge à rapport de charge constant et déplacement maximum variable pour les deux cas considérés :  $2*13$  blocs (gauche) et  $2*120$  blocs (droite)

La droite de référence parvient à prédire de façon correcte la propagation de délaminage en présentant moins de  $0,5mm$  d'écart entre la taille de fissure réelle et la prédiction. Bien que les vitesses des bas niveaux soient sous-estimées, elles présentent un écart d'au moins deux ordres de



grandeurs avec les vitesses des hauts niveaux pendant toute la durée de l'essai et influent très peu la prédiction de la propagation.

La courbe de propagation maîtresse sous-estime la prédiction de propagation, comme cela peut se voir en analysant la figure 4. Premièrement, le coefficient  $k$  de la courbe maîtresse est plus faible que celui de la droite de référence à  $R=0,1$ , ce qui engendre des vitesses plus faibles pour un même  $\Delta G_{eq}$  (Fig. 2). La deuxième raison est directement liée à l'effet de  $R$  observé sur les courbes en  $G_{max}$ . Sur la figure 4, un segment rouge est tracé sur la courbe de référence à  $R=0,1$  et un second sur la courbe maîtresse. Ils correspondent au même intervalle de valeurs  $G_{max}$ . Or le segment rouge débute à  $3,7e^{-3} mm/cycle$  lorsque tracé en fonction de  $G_{max}$  contre  $2,7e^{-3} mm/cycle$  avec  $\Delta G_{eq}$ . Donc la vitesse prédite par la courbe maîtresse est légèrement plus faible que celle prédite par la courbe de référence à  $R=0,1$  aux mêmes conditions d'essai. Cependant, cet écart reste faible et permet une prédiction à  $0,5mm$  près.

### 3.2.2 Spectre de charge à deux niveaux de $R$ et à $d_{max}$ constant

Dans cette partie, les essais sont réalisés à déplacement maximum constant. Ceux-ci sont fixés de telle manière que  $G_{max,initial} = 0,8*G_c$ . Le rapport de charge est fixé à  $R=0,1$  ou  $R=0,4$  suivant le bloc considéré.

De la même manière que précédemment, des spectres à deux blocs sont utilisés. Les données de propagation sont exprimées avec  $G_{max}$  et  $\Delta G_{eq}$ .

Les courbes de propagation résultantes sont représentées ci-dessous (Fig. 6). Les droites rouge et bleue sont respectivement les courbes de référence des spectres simples à  $R=0,1$  constant et  $R=0,4$  constant de la première partie (Fig. 2).

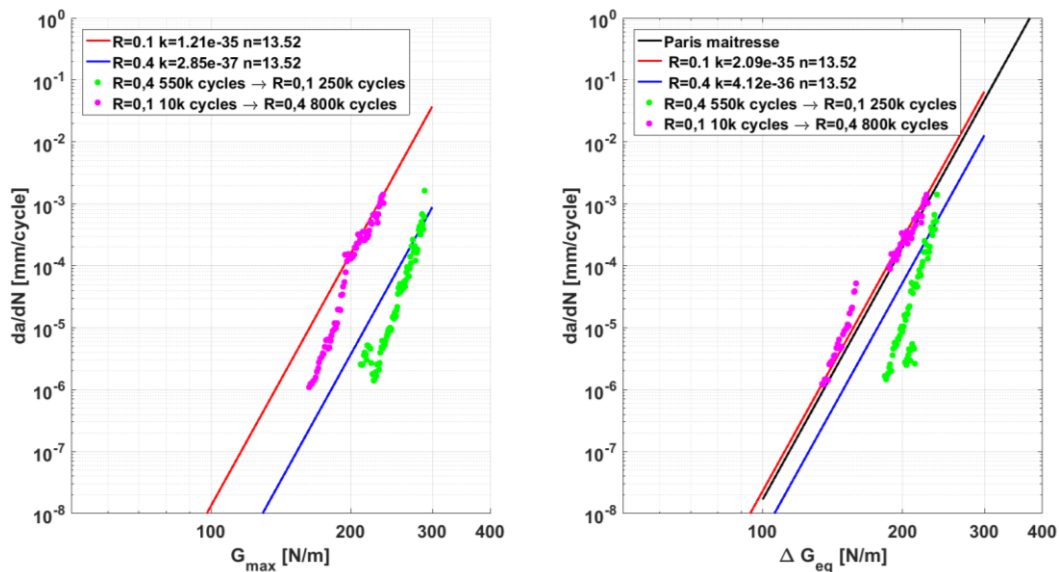


Fig. 6. Courbes de propagation de délaminage pour un spectre composé de deux blocs à rapport de charge différents en fonction de  $G_{max}$  (gauche) et  $\Delta G_{eq}$  (droite)

Le rapport de charge du premier bloc ( $R_1$ ) a une grande importance ici.

Quand  $R_1 = 0,4$ , on constate que la vitesse de propagation du premier bloc dévie de la courbe de référence associée. On note surtout que la vitesse de propagation lors du deuxième bloc à  $R_2 = 0,1$  est plus faible que celle de sa droite de référence. En début de bloc, elle est de  $5e^{-6} mm/cycle$  alors qu'au même niveau de  $G_{max}$ , la droite de référence présente une vitesse de propagation de  $3,5e^{-4} mm/cycle$ . Le premier bloc de rapport de charge plus élevé a certainement tendance à créer plus de pontages de fibres [7], ce qui explique l'augmentation de la résistance à la propagation pour le deuxième bloc  $R_2 = 0,1$ .

Quand  $R_1 = 0,1$ , on constate que la vitesse de propagation du premier bloc suit bien la droite de référence du rapport de charge. Le passage au second bloc  $R_2=0,4$  ralentit la vitesse mais ne suit pas la courbe de référence associée. Le premier bloc n'a pas engendré le même endommagement

que celui qui aurait été créé à  $R=0,4$ . La vitesse du second bloc est donc supérieure à celle de sa droite de référence.

Ensuite, des spectres de charge comprenant une succession de blocs à  $R = 0,1$  et  $R = 0,4$  sont considérés. Les détails des spectres de charge et les courbes de propagation obtenues sont présentés ci-dessous (Fig. 7).

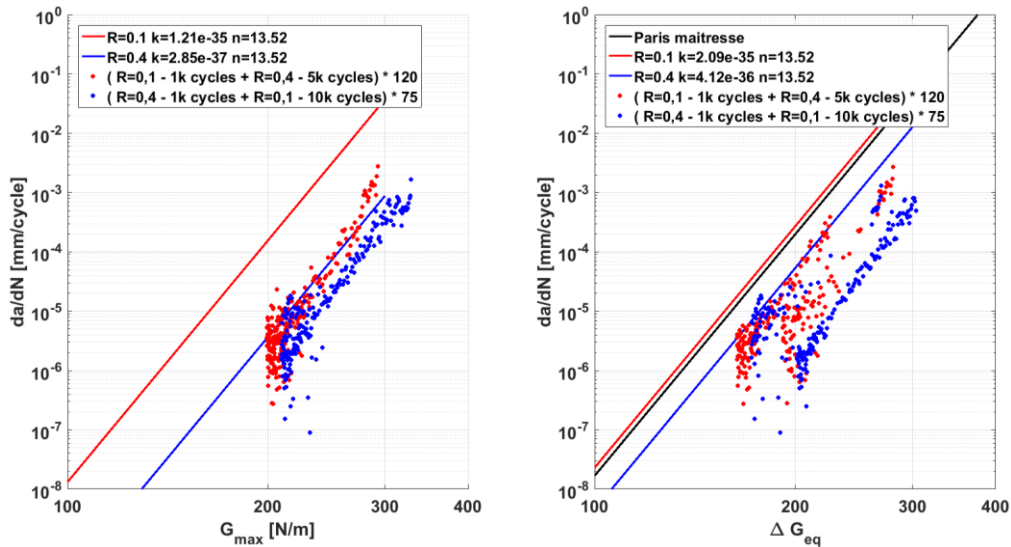


Fig. 7. Courbes de propagation de délaminage pour un spectre complexe alternant des blocs à  $R=0,1$  et des blocs à  $R=0,4$  en fonction de  $G_{max}$  avec les droites de référence (gauche) et  $\Delta G_{eq}$  avec la courbe maîtresse (droite)

Les courbes de propagation des spectres de charge à rapport de charge variable sont les mêmes que le premier bloc soit à  $R = 0,1$  ou à  $R = 0,4$ . Les vitesses de propagation des blocs réalisés à  $R = 0,4$  suivent la droite de référence associée. En revanche, les vitesses de propagation des blocs réalisés à  $R = 0,1$  sont bien inférieures à celles de la droite de référence à  $R = 0,1$ . Il se peut que l'endommagement créé durant les blocs à  $R = 0,4$  soit suffisant pour ralentir la propagation des blocs à  $R = 0,1$ .

En s'appuyant sur les coefficients de Paris des droites de référence à  $R=0,1$  et  $R=0,4$ , et ceux de la courbe maîtresse, la propagation du délaminage peut être estimée pour les spectres de charge à rapport de charge variable et déplacement maximum constant (Fig. 8).

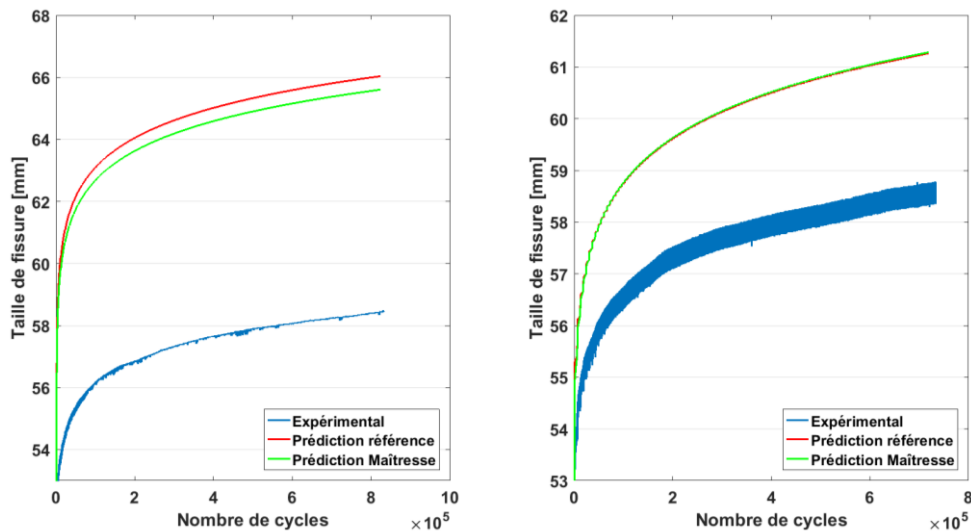


Fig. 8. Prédiction de la propagation du délaminage sous spectre de charge à rapport de charge variable et déplacement maximum constant pour les deux cas considérés :  $2*75$  blocs (gauche) et  $2*120$  blocs (droite)

Les prédictions réalisées, à partir des courbes de référence  $R=0,1$  et  $R=0,4$  et de la courbe maîtresse, surestiment la propagation. Ceci est dû au décalage des courbes de propagation réelles sous spectre complexe d'une part, et les courbes de référence sous spectre simple ainsi que la courbe maîtresse construite à partir de ces dernières, d'autre part.

La prédiction est d'autant plus surestimée pour le premier spectre complexe (Fig. 8 gauche) que le nombre de cycles à  $R=0,1$  est élevé, rapport pour lequel le décalage observé entre spectre complexe et spectre simple est le plus important.

#### 4. Conclusions

Des essais de fatigue classique à rapport de charge constant ont permis de tracer des courbes de propagation de référence à  $R=0,1$ ,  $R=0,4$  et  $R=0,6$ . L'effet du rapport de charge a été mis en évidence : à  $G_{max}$  fixe, l'augmentation du rapport de charge induit une diminution de la vitesse de propagation du délaminage. Mais  $G_{max}$  ne représente pas correctement la force motrice de fissure, car les paramètres d'influence importante sur la vitesse de propagation ne sont pas intégrés. La définition  $\Delta G_{eq}$  de Maillet [3] semble plus représentative car elle permet de construire une courbe maîtresse de propagation indépendante du rapport de charge pour les essais à spectre simple.

L'influence de la variation du rapport de charge sur la propagation a ensuite été explorée à l'aide de spectres complexes. Deux cas ont été considérés :  $\{R \text{ constant et deux niveaux de } d_{max}\}$  et  $\{\text{deux niveaux de } R \text{ et } d_{max} \text{ constant}\}$ .

Pour le premier type de spectre à  $R$  constant, un effet de l'historique a été observé. Il reste cependant négligeable, et la droite de référence du rapport de charge considéré permet de prédire la propagation du délaminage de manière correcte. Un écart de  $0,5mm$  entre les tailles de fissure prédite et expérimentale est obtenu.

Pour le second type de spectre à  $R$  variable, un effet plus conséquent de l'historique de chargement a été mis en évidence. La prédiction de propagation effectuée à l'aide de la droite maîtresse ne permet pas de traduire ce phénomène.

La définition  $\Delta G_{eq}$  nécessite d'être adaptée afin de prendre en compte les changements de vitesse de propagation observés dans les spectres complexes. Des études complémentaires sont requises pour l'introduction d'un paramètre qui prendrait en compte l'historique du chargement, surtout lorsque  $R$  varie.

#### Remerciements

Les travaux sont soutenus par la DGA et la région Occitanie.

#### Références

- [1] Federal Aviation Administration, «AC20-107B Composite Aircraft Structure,» 2009.
- [2] S. D. Drowning et D. F. Socie, «Simple rainflow counting algorithms,» *International Journal of Fatigue*, pp. 31-40, Jan. 1982.
- [3] I.Maillet, L.Michel, F.Souric et Y.Gourinat, «Mode II fatigue delamination growth characterization of a carbon/epoxy laminate at high frequency under vibration loading,» *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 149, pp. 298-312, 2015.
- [4] M. Hojo, K. Tanaka, C. Gustafson et R. Hayashi, «Effect of stress ratio on near-threshold propagation of delamination fatigue cracks in unidirectionnal CFRP,» *Composites science and technology*, vol. 29, pp. 273-292, 1987.
- [5] C. Rans, R. Alderliesten et R. Benedictus, «Misinterpreting the results : How similitude can improve our understanding of fatigue delamination growth,» *Composites Science and Technology*, vol. 71, pp. 230-238, 2011.
- [6] L. Yao, R. Alderliesten et R. Benedictus, «Interpreting the stress ratio effect on delamination growth in composite laminates using the concept of fatigue fracture toughness,» *Composites : Part A*, vol. 78, pp. 135-142, 2015.
- [7] L. Yao, Y. Sun, M. Zhao, R. Alderliesten et R. Benedictus, «Stress ratio dependence of fibre bridging significance in mode I fatigue delamination growth of composite laminates,» *Composites : Part A*, vol. 95, pp. 65-74, 2017.