



HAL
open science

Mise en place d'un essai de détermination de seuil de propagation en fatigue du délaminage de mode I basé sur la résonance d'une éprouvette en matériau composite unidirectionnel

I. Maillet, Laurent Michel, M. Fressinet, Guilhem Michon, Yves Gourinat

► To cite this version:

I. Maillet, Laurent Michel, M. Fressinet, Guilhem Michon, Yves Gourinat. Mise en place d'un essai de détermination de seuil de propagation en fatigue du délaminage de mode I basé sur la résonance d'une éprouvette en matériau composite unidirectionnel. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.30. hal-00597894

HAL Id: hal-00597894

<https://hal.science/hal-00597894>

Submitted on 2 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.

Mise en place d'un essai de détermination de seuil de propagation en fatigue du délaminage de mode I basé sur la résonance d'une éprouvette en matériau composite unidirectionnel

New test methodology based on structure resonance for mode I fatigue delamination growth onset of unidirectionnal composite

I. Maillet¹, L. Michel¹, M. Fressinet², G. Michon¹ et Y. Gourinat¹

1 : Université de Toulouse, INSA, UPS, Mines Albi, ISAE,
ICA (Institut Clément Ader), Toulouse, France

e-mail : irene.maillet@isac.fr , laurent.michel@isac.fr , guilhem.michon@isac.fr , yves.gourinat@isac.fr

2 : DGA Techniques Aéronautiques, Toulouse, France

e-mail : mathieu.fressinet@dga.defense.gouv.fr

Résumé

Un dispositif d'essai de détermination de seuil de propagation de délaminage en mode I par fatigue vibratoire a été mis en place. Ce système d'essai basé sur l'éprouvette DCB est un système dynamique masse-ressort-éprouvette qui est mis en résonance. Les conditions opératoires définies permettent d'effectuer des essais de propagation de délaminage à effort imposé et d'appliquer une condition d'arrêt reproductible et identique à celle des essais normalisés qui s'effectuent à plus basse fréquence (10Hz). Ce système permet d'effectuer des essais de fatigue jusqu'aux environs de 100Hz, ce qui permet d'accélérer les essais d'un facteur 10 sans générer d'échauffement du matériau ainsi qu'il a été observé lors des essais.

Une première comparaison avec des essais menés selon la norme ASTM a permis de mettre en relief un effet de la fréquence sur les essais de seuil de propagation en mode I. Une diminution de la résistance à la propagation de délaminage est observée avec l'augmentation de la fréquence pour le matériau étudié.

Abstract

A test device of mode I fatigue delamination growth onset by vibratory fatigue has been set up. This test system based on the DCB test specimen is a mass-spring-specimen dynamic system which is put in resonance. The defined operating conditions allow performing delamination propagation tests under imposed load and stopping the test under reproducible conditions, identical to that of the standardized tests which are made at lower frequency (10Hz). This system allows performing fatigue tests up to 100Hz, which means a division of the test duration by 10 and this without heat generation in the material as it was observed during the tests.

A first comparison with tests led according to the standard ASTM shows an effect of the frequency on mode I fatigue delamination growth onset tests. A decrease of the resistance to delamination propagation is observed with an increase in frequency for the composite under study.

Mots Clés : composite, délaminage, vibration, fatigue, mode I, expérimentation

Keywords : composite, delamination, vibration, fatigue, mode I, experiments

1. Introduction

Les matériaux composites stratifiés sont largement utilisés dans l'aéronautique de par leur légèreté, leur grande rigidité et leur adaptabilité aux efforts. Toutefois, ce type de matériau est très sensible aux dommages et notamment aux délaminages qui en se propageant peuvent dégrader de façon catastrophique ses propriétés mécaniques. Des essais en fatigue ont donc été définis pour caractériser la propagation de fissure dans les matériaux composites [1-2]. Dans la norme associée [1] ceux-ci sont réalisés à l'aide de machine hydraulique de traction-compression à une fréquence comprise entre 1Hz et 10Hz. La plage d'endurance étudiée ne dépasse jamais les 10^7 cycles du fait de la durée d'essai à de telles fréquences. Ainsi, le comportement en fatigue des matériaux composites à très grand nombre de cycle n'est de nos jours pas connu [3]. Pourtant, les structures

aéronautiques sont soumises à de la fatigue acoustique où les contraintes appliquées sont faibles, mais répétées à haute fréquence et peuvent engendrer des propagations de fissures ou de délaminages en peu de temps [4]. Dans le but donc de mesurer des seuils de propagation de délaminage en mode I à grand nombre de cycle, un moyen d'essai accéléré a été mis en place. Ce dernier s'appuie sur le principe de résonance et permet de réaliser des essais à 90Hz divisant ainsi par 10 la durée nécessaire des tests classiques.

2. Présentation de l'essai dynamique

Les essais dynamiques utilisent le principe de résonance et sont réalisés à l'aide d'un pot vibrant. Le système mécanique utilisé ressemble à une machine inertielle de traction-compression (cf. Fig. 1.).

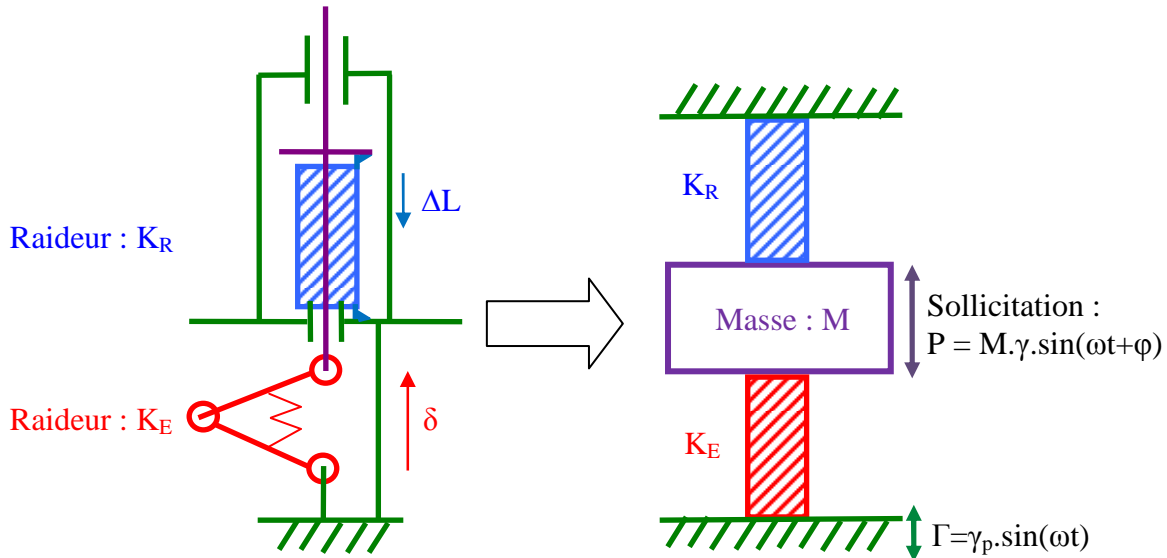


Fig. 1. Schéma cinématique du montage d'essai dynamique.

Sa dynamique est celle d'un système masse-ressorts où l'éprouvette est représentée par sa raideur d'ouverture. Un ressort est monté en parallèle de cette éprouvette; la mise en compression de ce ressort permet de fixer l'ouverture initiale de l'éprouvette et ainsi de définir le niveau moyen de la sollicitation (F_{moy}) (cf. 4.1.Réglage de F_{moy}).

Pendant l'essai, le pot vibrant génère une accélération sinusoïdale qui provoque la mise en mouvement de la masse M et donc la sollicitation de l'éprouvette autour de sa position d'équilibre. La fréquence d'excitation est choisie égale à la fréquence de résonance du système dynamique afin de bénéficier du facteur d'amplification liée à la résonance.

Le réglage du cyclage à amplitude constante (F_{amp}) est réalisé par l'asservissement du niveau de l'accélération de la masse M (cf. 4.2.Réglage de F_{amp}). (cf. Fig. 2.)

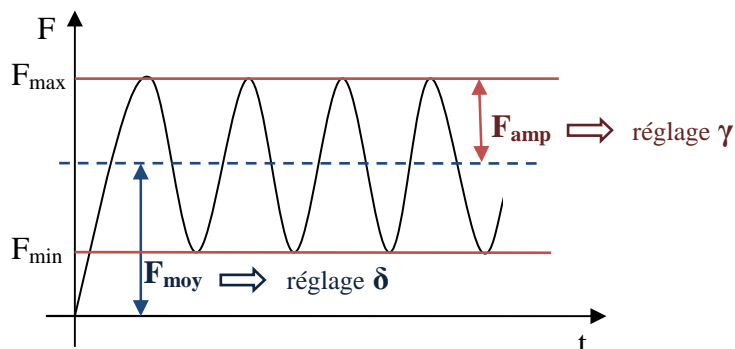


Fig. 2. Paramètres de cyclage de l'éprouvette

Le rapport R de la sollicitation est complètement déterminé par F_{moy} et F_{amp} :

$$R = \frac{F_{min}}{F_{max}} = \frac{F_{moy} - F_{amp}}{F_{moy} + F_{amp}} \quad (\text{Eq. 1})$$

3. Matériau et éprouvettes

3.1 Configuration des éprouvettes

Les éprouvettes utilisées sont unidirectionnelles, composées de 20 plis de 0.25mm d'épaisseur en matériau T700/M21. Pour créer un délaminage initial, un insert en téflon de 12 μ m est positionné à mi-épaisseur pendant la fabrication. Avant les essais de fatigue les éprouvettes sont pré-fissurées sur 1 à 2 mm pour casser l'amas de résine résidu de la polymérisation.



Fig. 3. Géométrie de l'éprouvette.

Le premier type d'éprouvette utilisé est conforme aux standards ASTM de l'essai de propagation de délaminage en mode I ($L=180\text{mm}$, $b=25\text{mm}$, $h=2.5\text{mm}$, $a_0=50\text{mm}$ cf. Fig. 3.) [1]. Elle est instrumentée avec une jauge de fissuration pour suivre l'avancée de la fissure tout au long de l'essai. Le chargement est appliqué par l'intermédiaire d'étriers collés de part et d'autre de l'éprouvette. (cf. Fig. 4.)

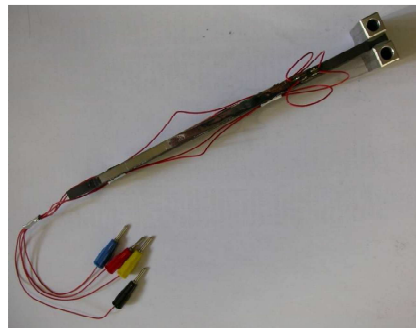


Fig. 4. Eprouvette d'essai classique.

Une éprouvette spécifique a été mise en place pour les essais dynamiques. Elle est de forme semblable à la précédente. Cependant pour s'adapter aux contraintes d'un essai dynamique, les longueurs de fissure et de l'éprouvette ont été modifiées ($L=80\text{mm}$, $b=25\text{mm}$, $h=2.5\text{mm}$ et $a_0=30\text{mm}$, cf. Fig. 3.). La longueur totale de l'éprouvette est de 80mm pour que le mode de flexion de poutre ne vienne pas perturber la dynamique du système. La taille de fissure initiale est réduite afin d'augmenter la raideur d'ouverture de l'éprouvette et ainsi d'assurer une fréquence de résonance la plus élevée possible pour le système.

Le taux de restitution d'énergie est très sensible à la taille de fissure et donc à sa mesure exacte. Pour déterminer cette longueur, un calcul d'incertitude sur le taux d'énergie de restitution a été réalisé à partir de la précision des instruments de mesure et du réglage de l'ouverture initiale. Une longueur initiale de fissure de 30mm donne un compromis acceptable entre raideur et précision : $K_E=120\text{N/mm}$ avec une incertitude inférieure à 20% pour $G=100\text{N/m}$.

Pour avoir un indicateur d'ouverture de fissure, un contacteur a été ajouté en bout d'éprouvette (cf. Fig. 5.).

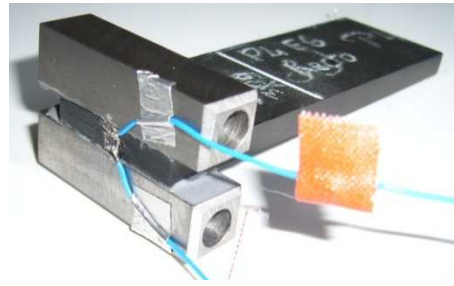


Fig. 5. Eprouvette d'essai.

3.2 Loi de complaisance des éprouvettes

Un essai préliminaire de résistance à la fissuration a été effectué pour différentes tailles de fissure afin de déterminer la courbe maitresse de complaisance du type d'éprouvette utilisé. Celle-ci est nécessaire pour connaître la raideur de l'éprouvette en fonction de la taille de la fissure et permet de suivre l'avancée de fissure pendant l'essai (cf. Fig. 6.).

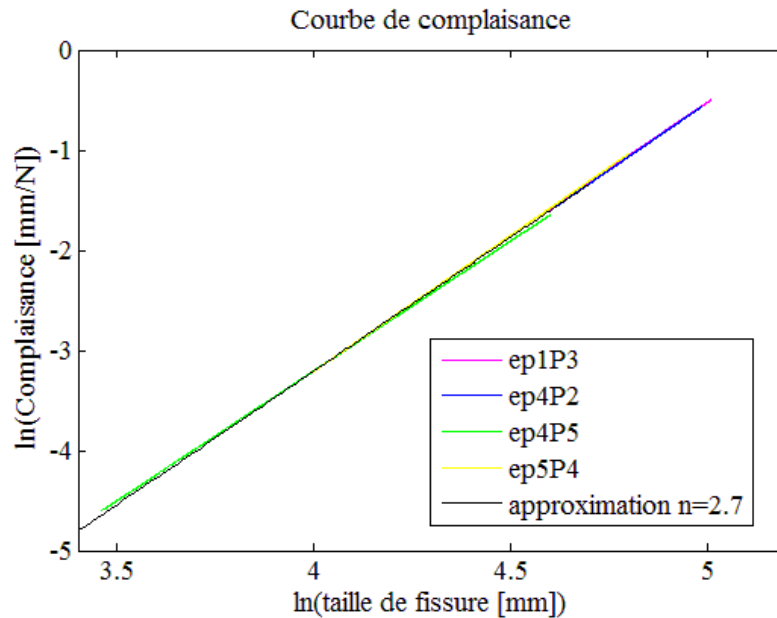


Fig. 6. Courbe de Complaisance T700/M21.

4. Détermination des conditions expérimentales et procédure d'essai

4.1 Réglage du niveau moyen d'effort en fatigue: F_{moy}

Le réglage de la position initiale répond à l'équilibre suivant (cf. Fig. 1.):

$$F_{moy} = K_E \cdot \delta = -M \cdot g - K_R \cdot \Delta l \quad (\text{Eq. 2})$$

Comme l'axe principal est solidaire de l'éprouvette, l'ouverture de la fissure est réalisée sur un marbre à l'aide d'un laser de déplacement pointé sur l'axe (fig.7 à gauche). La mesure de l'ouverture commence dès que le contact en bout d'éprouvette se rompt (Fig.7 à droite). La position d'équilibre initiale est bloquée à la position voulue à l'aide d'une liaison écrou/contre-écrou (cf. Fig. 7. au centre).

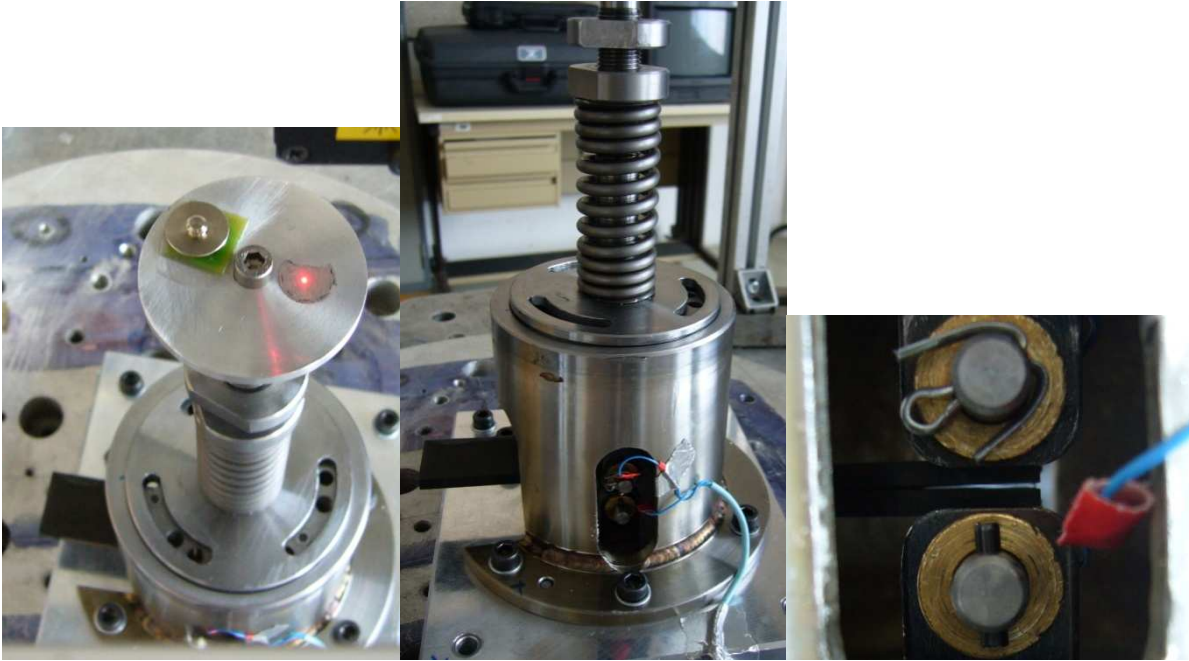


Fig.7. Réglage de la position d'équilibre.

4.2 Réglage de l'amplitude d'effort du cycle de fatigue : F_{amp}

Dynamique du système

La dynamique du système amorti sans excitation se décrit comme suit :

$$M\ddot{u}_m + C\dot{u}_m + K_t u_m = 0 \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\ddot{u}_m + 2\xi_r \omega_r \dot{u}_m + \omega_r^2 u_m = 0 \quad (\text{Eq. 4})$$

Avec u_m le déplacement de la masse, $K_t = K_E + K_R$ la raideur du ressort équivalent et ξ_r l'amortissement réduit tel que :

$$\xi_r = \frac{C}{2\sqrt{K_t M}} \ll 1 \quad (\text{Eq. 5})$$

La pseudo pulsation propre du système est alors la suivante :

$$\varpi_r = \omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2} \approx \omega_r = \sqrt{\frac{K_t}{M}} \quad (\text{Eq. 6})$$

La dynamique du système global soumis à l'accélération du pot est alors régie par l'équation suivante :

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + K_t u = -M \cdot \ddot{u}_p \quad (\text{Eq. 7})$$

Avec u le déplacement relatif de la masse par rapport au pot vibrant et u_p le déplacement du pot vibrant.

En passant dans le domaine de Laplace :

$$U(-\omega^2 M + i\omega C + K_t) = \omega^2 M \cdot U_p \quad (\text{Eq. 8})$$

avec ω la pulsation d'excitation du système.

La fonction de transfert en accélération du système est la suivante :

$$H(\omega) = \frac{\ddot{U}}{\ddot{U}_p} = \frac{\omega^2 M}{-\omega^2 M + i\omega C + K_t} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^2}{1 + 2i\xi_r \frac{\omega}{\omega_r} - \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^2} \quad (\text{Eq. 9})$$

De cette équation sont tirés le module qui ici représente le facteur d'amplification de la masse par rapport au pot vibrant et la phase (φ) qui à la fréquence de résonance est égal à $\varphi_r = -90^\circ$. Un balayage fréquentiel permet donc de déterminer la fréquence de résonance du système global et le facteur d'amplification associé. Ce dernier permet de connaître la valeur de l'accélération à injecter à l'aide du pot vibrant pour obtenir une accélération de la masse donnée. Pour profiter au mieux du facteur d'amplification, le cyclage de l'éprouvette est réalisé sur la fréquence de résonance du système.

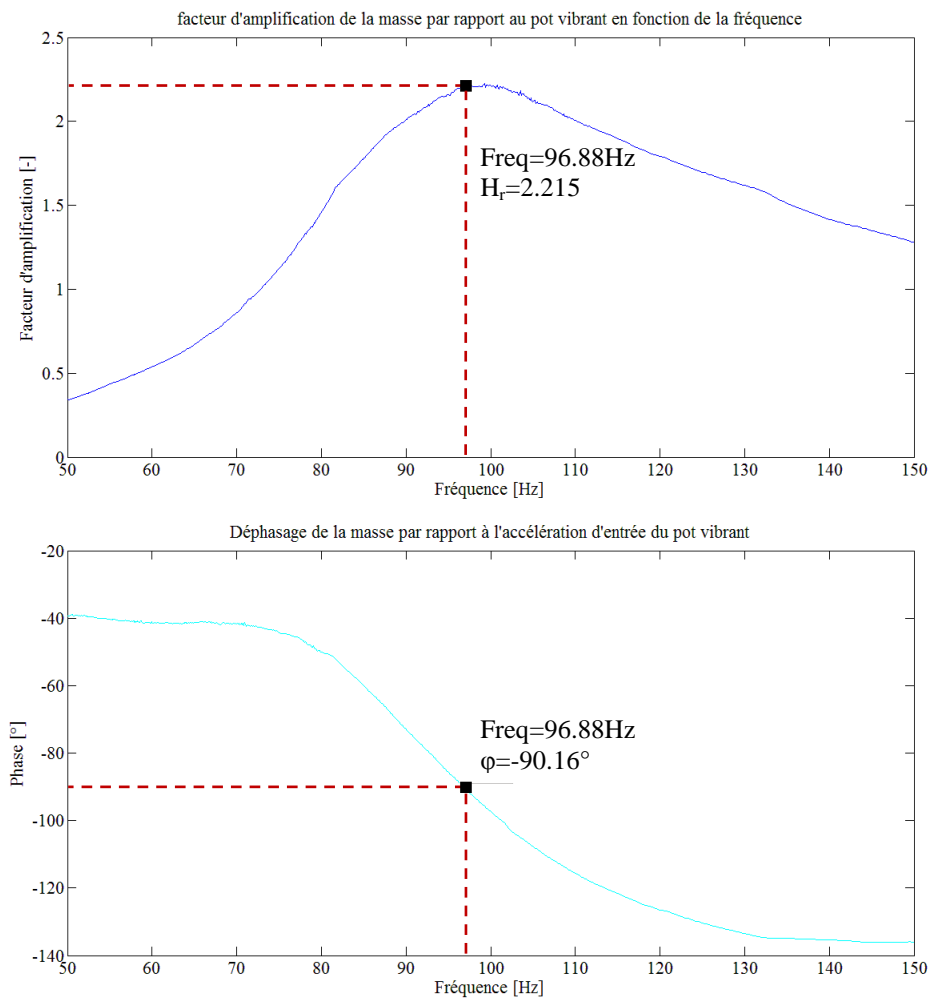


Fig. 8. Fonction de transfert du système

Le déplacement de la masse se déduit de son accélération :

$$\begin{cases} \ddot{u} = \gamma \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \\ u = -\frac{\gamma}{\omega^2} \sin(\omega \cdot t + \varphi) \end{cases} \quad (\text{Eq. 10})$$

L'effort imposé à l'éprouvette est donc :

$$F_{amp} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) = -K_E \cdot u = K_E \frac{\gamma}{\omega^2} \sin(\omega \cdot t + \varphi) = K_E \frac{|H(\omega)|\gamma_p}{\omega^2} \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (\text{Eq. 11})$$

4.3 Définition des conditions de pilotage en fatigue

Afin de réaliser l'essai de fatigue et de déterminer le seuil de propagation de la fissure à un niveau et un rapport de charge donné (cf. Fig.2), l'amplitude de l'effort (F_{amp}) doit être maintenue constante pendant le cyclage. Ces conditions opératoires doivent être maintenues constantes pendant une partie de la propagation de la fissure jusqu'à atteindre le critère de propagation défini.

Avant propagation de la fissure

Il a été décidé de piloter directement l'amplitude de l'accélération de la masse M (γ) et non l'amplitude du pot vibrant (γ_p) ce qui se fait habituellement. Cela a l'avantage de s'affranchir de la détermination précise de la fonction de transfert du système : éprouvette-masse-ressort qui est assez difficile à réaliser. En effet, déterminée par balayage fréquentiel elle est sensible à la vitesse de balayage. De plus des frottements dus au guidage entraînent une légère non-linéarité de réponse du système qui nuit à une détermination précise.

Une consigne en amplitude de l'accélération de la masse γ_c est donc imposée pendant le cyclage et permet de connaître précisément l'effort imposé à l'éprouvette DCB (cf. Eq. 11).

$$F_{amp} = K_E \frac{\gamma_c}{\omega^2} \quad (\text{Eq. 12})$$

A la propagation de la fissure

Il a été décidé de suivre la fréquence de résonance pendant le cyclage, ce qui présente deux avantages lorsque la fissure propage en fin d'essai:

- **Suivre l'avancée de fissure en temps réel et définir un critère d'arrêt de l'essai**

Lorsque la fissure de délaminage propage, la raideur en ouverture de l'éprouvette diminue et par voie de conséquence la fréquence de résonance [6]. La courbe de la fonction de transfert se décale vers les fréquences plus basses. Quand le cyclage est effectué à fréquence fixe, le facteur d'amplification diminue (cf. Fig. 8.). Ainsi, comme l'essai est asservi sur l'accélération relative de la masse, l'accélération injectée par le pot vibrant augmente pour respecter γ_c . Cette augmentation d'accélération d'entrée est dans ce cas le seul indicateur de l'avancée de la fissure qu'il est difficile de quantifier précisément.

Dans le cas du cyclage sur résonance qui a été choisi, la consigne en fréquence s'adapte en temps réel pour se caler sur la fréquence de résonance (par suivi de la phase afin que $\varphi = \varphi_r$). Le changement de fréquence d'entrée est alors directement lié à la variation de raideur de l'éprouvette et à la longueur de propagation de fissure via la loi de complaisance (Fig. 6).

La fréquence d'arrêt de l'essai est calculée pour une chute en raideur de l'éprouvette de l'ordre de 5% ainsi qu'il est préconisé dans l'essai normalisé de fatigue [1], ce qui équivaut en moyenne à un décalage de 1,5Hz pour nos éprouvettes d'essais par rapport à la fréquence initiale de cyclage.

- **Compenser la chute de raideur pour garder F_{amp} quasiment constante**

Lorsque le délaminage propage, la raideur d'ouverture de l'éprouvette diminue. Le niveau moyen d'effort imposé à l'éprouvette F_{moy} n'est pas modifié par cette variation de raideur, mais l'amplitude de l'effort imposé F_{amp} diminue ainsi que le rapport R (cf. Eq. 1, 2 & 12).

A la fréquence de résonance (cf. Eq. 6) :

$$F_{amp} = K_E \frac{\gamma_c}{\omega_r^2} = \frac{K_E}{K_t} M \cdot \gamma_c = \frac{K_E}{K_E + K_R} M \cdot \gamma_c \quad (\text{Eq. 13})$$

En suivant la fréquence de résonance la chute de raideur est mieux compensée car la diminution de la fréquence de sollicitation permet de compenser en partie la diminution de K_E dans l'expression de F_{amp} . Pour que F_{amp} soit strictement constante, il faudrait adapter γ_c telle que :

$$\frac{\gamma_c(f)}{\gamma_c(f_0)} = \frac{\frac{K_E(f)}{K_E(f)+K_R} M \cdot \gamma_c(f)}{\frac{K_E(f_0)}{K_E(f_0)+K_R} M \cdot \gamma_c(f_0)} = 1 \quad (\text{Eq. 14})$$

Mais ce pilotage est trop complexe à mettre en place pour un gain de qualité d'essai assez limité. Pour un décalage fréquentiel de l'ordre de 1,5Hz, critère d'arrêt de l'essai, la variation de consigne en accélération serait de l'ordre de 0.2g, ce qui est négligeable.

4.4 Moyens d'essais et procédé opératoire

Les essais sont réalisés sur le pot vibrant du centre DGA Techniques Aéronautiques. Deux accéléromètres sont utilisés pour suivre les accélérations de la masse et du pot vibrant. Un montage soustracteur de tension permet de mesurer l'accélération de la masse relativement au pot vibrant avec lequel le système assure le pilotage. Les données enregistrées en cours d'essais sont : l'amplitude de l'accélération relative de la masse et la fréquence de sollicitation.

L'échauffement de l'éprouvette est contrôlé par caméra thermique sur l'ensemble de l'éprouvette et aussi près de la pointe de fissure.

Les essais sont ainsi pilotés en fixant l'accélération relative de la masse M à une valeur constante tout en suivant la fréquence de résonance du système.

Une fois l'ouverture initiale réglée, un balayage fréquentiel est réalisé à faible accélération afin de mesurer la fréquence de résonance du système global et le facteur d'amplification.

Connaissant la taille de la fissure initiale et donc sa raideur initiale, la masse apparente mise en mouvement par le système est déduite précisément par calcul (en effet cette masse dépend pour une partie des conditions de montage). L'accélération γ_c nécessaire pour imposer l'effort de cyclage visé est alors déterminée par calcul (Eq. 13).

L'accélération minimale à injecter par le pot vibrant est calculée avec le facteur d'amplification et permet de s'assurer de la capacité du pot à piloter l'essai.

Le cyclage s'arrête quand la fréquence finale est atteinte (cf.4-3-propagation de fissure).

5. Exploitation des résultats

Les résultats sont exploités sous la forme d'une courbe de Wöhler en utilisant la méthode de calibration de la complaisance [5] :

$$G_I = \frac{nP\delta}{2ba} \quad (\text{Eq.15})$$

avec $n=2,7$ pour notre matériau, déterminé à l'aide de la courbe de complaisance (cf. Fig. 6.). Ils sont comparés aux résultats obtenus par la méthode classique d'essais en fatigue réalisés à 10Hz à l'aide d'une machine hydraulique de traction compression. Ces derniers sont pilotés en déplacement pour un rapport R égal à 0,1. L'accroissement de la fissure est suivi à l'aide d'une jauge de fissuration. Et les conditions d'arrêt sont celles fixés par la norme.

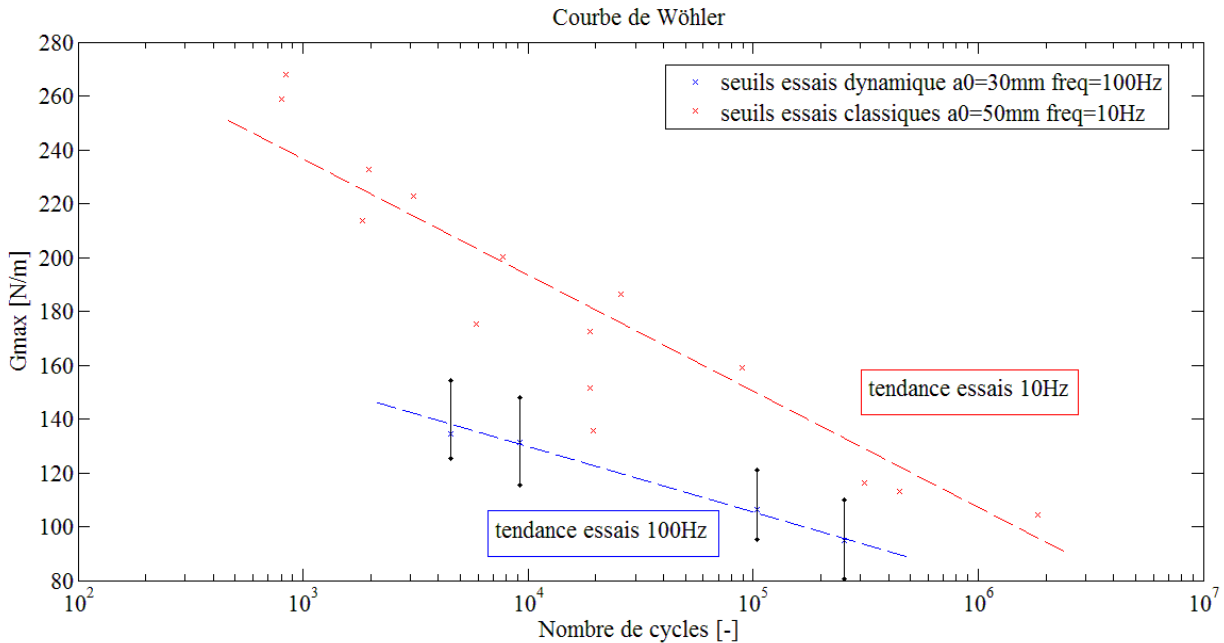


Fig. 9. Courbe de Wöhler.

Les seuils de propagations obtenus des essais à 100Hz sont plus faibles que ceux à 10Hz (cf. Fig. 9.). Le contrôle de la température pendant la fatigue vibratoire à 100Hz n'a pas montré d'échauffement significatif du matériau (évolution relative de température inférieure à 1°C en pointe de fissure). Ainsi, cette première série d'essais met en relief un effet de fréquence. Lorsque la fréquence augmente, la résistance du matériau à la propagation de fissure semble diminuer.

6. Conclusions et perspectives

Un dispositif d'essai de détermination de seuil de propagation de délaminage en mode I par fatigue vibratoire à résonance a été mis en place. Ce système d'essai basé sur l'éprouvette DCB est un système dynamique masse-ressort-éprouvette qui est mis en résonance. Les conditions opératoires définies permettent d'effectuer des essais de propagation de délaminage à effort imposé et d'appliquer une condition d'arrêt reproductible et identique à celle des essais normalisés qui s'effectuent à plus basse fréquence (10Hz). L'utilisation d'une éprouvette de type DCB limite la fréquence de résonance du système aux environs de 100Hz. Cette fréquence de cyclage de fatigue permet cependant d'accélérer les essais d'un facteur 10 sans générer d'échauffement du matériau ainsi qu'il a été observé.

Une première comparaison avec des essais menés selon la norme ASTM [1] a permis de mettre en relief un effet de la fréquence sur les essais de seuil de propagation en mode I. On observe une diminution de la résistance à la propagation de délaminage pour le matériau étudié avec l'augmentation de la fréquence. Des essais complémentaires seront réalisés à 70Hz pour confirmer cette tendance.

Il n'est pas exclu de réaliser des essais de propagation de fissure en utilisant une consigne en accélération permettant de piloter précisément le rapport R, tout en sachant que cet essai sera nécessairement à fréquence variable de par le principe même de la mise en résonance.

Références

- [1] « Standard Test Method for Mode I Fatigue Delamination Grows Onset of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite ». *ASTM D6115*, 1997
- [2] M. Hojo, T. Ando, M. Tanaka, T. Adachi, S. Ochiai, Y. Endo, « Modes I and II interlaminar fracture toughness and fatigue delamination of CF/epoxy laminates with self-same epoxy interleaf ». *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, pp. 1154-1165, 2006.
- [3] C. Bathias, « An engineering point of view about fatigue of polymer matrix composite materials ». *International Journal of Fatigue*, 28, 2006, pp. 1094-1099.

- [4] P.D. Green, « Current and future problems in structural acoustic fatigue ». *Impact of Acoustic Loads on Aircraft Structures*, AGARD-CP-549, 1994.
- [5] « Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite ». *ASTM D5528*, 1994
- [6] D.A. Saravanos, D.A. Hopkins, « Effects of delaminations on the damped dynamic characteristics of composite laminates : analysis and experiments ». *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 192, Issue 5, pp. 977-993, 1996.