



A XI-a Conferință Națională multidisciplinară – cu participare internațională,
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii românești",
SEBEȘ, 2011

DETERMINATION D'UN CRITERE DE FATIGUE D'UN MATERIAU COMPOSITE PAR UNE METHODE NON DESTRUCTIVE

Moussa KARAMA

DETERMINAREA UNUI CRITERIU DE OBOSEALĂ A UNUI MATERIAL COMPOZIT PRINTR-O METODĂ NEDISTRUCTIVĂ

Este propusă o nouă metodă de determinare a limitei de rezistență a unui compozit cu o cameră în infraroșu. Testele de oboseală pe o epruvetă pentru creșterea nivelului de încărcare, fac posibilă o analogie între încălzirea locală și prejudiciu. Rezultatele sunt comparate cu curbele Wöhler obținute pe un număr mare de exemple.

Cuvinte cheie: oboseală, compozite, infraroșu, prejudiciu, limită de duranță

DETERMINATION A FATIGUE CRITERION OF A COMPOSITE MATERIAL BY A NONDESTRUCTIVE METHOD

A new method of determination of the limit of endurance of a composite by an infra-red camera is proposed. Fatigue tests on a specimen on increasing levels of load, makes it possible to make the analogy between the local heating and the damage. The results are compared with the curves of Wöhler obtained with a great number of specimens.

Keywords: fatigue, composites, infrared, injury, old endurance
Mots clés: fatigue, composite, infrarouge, endommagement, limite d'endurance

1. Introduction

Le dimensionnement des structures dépend de la nature des sollicitations auxquelles elles sont soumises. Le chargement peut être constant ou, et c'est le cas le plus général, variable au cours du temps. On peut citer par exemple les pièces de suspension automobiles ou les ailes d'un avion dont les sollicitations en service varient.

Le phénomène de fatigue touche en fait tous les objets qui nous entourent et qu'une utilisation répétée finit par détériorer. Le nombre de répétitions et le niveau du chargement sont des paramètres déterminants quant à la durée de vie de ces éléments, c'est-à-dire la période pendant laquelle ils assurent correctement leur fonction. La raison essentielle du peu d'entrain des mécaniciens à réaliser des essais de fatigue est leur coût important. Celui-ci est dû entre autres au caractère particulièrement dispersif du phénomène de fatigue et de la durée proprement dite des essais.

Cette grande dispersion impose, pour chaque type de vérification expérimentale en fatigue, de nombreux essais de façon à obtenir des résultats représentatifs. La démarche de suivi de l'endommagement des éprouvettes en fonction du nombre de cycle afin de quantifier la durée de vie du matériau a été effectuée à l'aide d'une caméra infrarouge pour évaluer la variation de la température pendant l'essai de fatigue. Une approche des mécanismes d'endommagement par fatigue basée sur le traitement des d'images de dissipation est proposée. La limite d'endurance obtenue par méthode énergétique est présentée [1].

Le matériau de notre étude réalisé par l'entreprise Turbomeca (Bordes, 64), employé pour ses hautes propriétés mécaniques dans la confection des tulipes d'entrée d'air des turbomoteurs est un stratifié obtenu par l'empilement de tissus de type satin 5. Il s'agit de plaques composites tissées à $\pm 45^{\circ}$ de longueur 250 mm et de largeur 25 mm avec un trou de 5 mm au centre de l'éprouvette.

2. Etude expérimentale

2.1. Dispositif d'essai

Les essais de fatigue sont réalisés sur une machine de fatigue SCHENCK avec un servo-hydraulique de marque Instron (figure 1). Cette machine est équipée d'un capteur de force de 30 kN. Les déformations sont mesurées au moyen d'un extensomètre Instron d'une longueur de jauge de 25 mm suivant la longueur de l'éprouvette. La centrale d'acquisition assure le traitement des données du capteur de force, de l'extensomètre et du capteur de position. L'enregistrement

des données se fait sur le PC via le logiciel Wavemaker Runtime. Le pilotage des essais de fatigue est effectué en effort avec un rapport de charge de 0,1.

Les éprouvettes sont toutes sollicitées à une fréquence de 10 Hz. Le nombre de cycles total est limité à 106 cycles. Une caméra infrarouge est utilisée pour mesurer la variation et l'évolution de la température pendant les essais de fatigue. En effet, cette technique de mesure de température exploite le rayonnement infrarouge émis naturellement par les objets dès lors que leur température est supérieure au zéro absolu (0 K).

L'analyse se fait par conséquent sans contact ce qui est une des conditions requises pour mesurer sans perturbation de si faibles variations de température. L'autre avantage décisif est l'accès à une cartographie de surface. Ainsi tous les points à la surface d'un objet peuvent-ils être mesurés simultanément. La résolution thermique de notre caméra (différence de température équivalente au bruit) est de l'ordre de 20 mK à 30 °C.

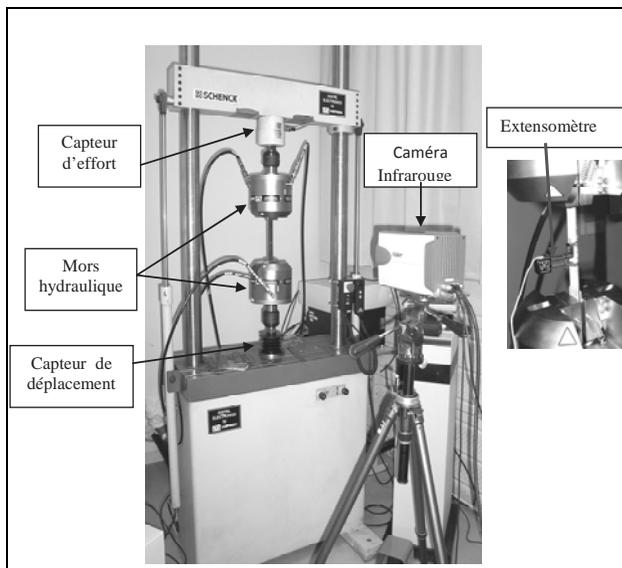


Figure1 Machine de fatigue

Le comportement en fatigue des matériaux est déterminé lors d'essais cycliques qui diffèrent les uns des autres par le type de sollicitation choisi (traction, flexion, compression, torsion, voir

combinaison de plusieurs types) et la façon de soumettre les sollicitations aux éprouvettes (signal carré, sinusoïdal, triangulaire).

Lorsque le type de sollicitation et la forme du signal sont choisis, les notions de rapport des contraintes R ($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$) et de contrainte moyenne (σ_{moy}) sont introduites afin de différencier les différents essais. Ainsi lorsque nous parlons de rapport des contraintes, nous entendons le rapport entre la contrainte minimale appliquée (σ_{\min}) et la contrainte maximale appliquée (σ_{\max}).

Dans la caractérisation des structures mécanique, les essais de fatigue permettent l'obtention de plusieurs caractéristiques (la limite de fatigue, la limite d'endurance, la durée de vie, le rapport d'endurance). Nous allons nous intéresser à la détermination de la limite d'endurance, pour laquelle il est constaté 50 % de rupture après un nombre fini de cycles (habituellement 10^7 cycles).

2.2. Détermination de la limite d'endurance par thermographie infrarouge

2.2.1. Thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est une technique de mesure qui permet l'obtention d'une image thermique reprenant la répartition de la température en surface de l'objet examiné. La thermographie procède par décodage, à l'aide d'un détecteur approprié, de l'information "température" issue du rayonnement infrarouge émis par tout objet.

L'avantage principal de la thermographie infrarouge est son caractère non intrusif. La déformation des matériaux solides s'accompagne presque toujours de dégagements de chaleur. Lorsque le matériau se déforme ou s'endommage et se fissure, une partie de l'énergie nécessaire à l'amorçage et à la propagation de l'endommagement est transformée de façon irréversible en chaleur [2]. Cette technique est utilisée pour sa rapidité et sa simplicité de mise en œuvre. Les principales applications intéressent plusieurs secteurs (construction automobile, aéronautique) et plus récemment, la détermination rapide de limite de fatigue et la localisation de zone d'endommagement [3].

2.2.2. Mesure de la dissipation

Cette méthode d'analyse thermographique est plus basée sur la mesure de l'énergie dissipée du fait de la dégradation du matériau plutôt que sur la mesure de la quantité de chaleur totale dégagée. L'énergie dissipée est liée aux modifications structurales irréversibles

de l'éprouvette durant un essai de fatigue (plasticité, rupture des liaisons interatomiques) [4]. Ainsi la chaleur dégagée due au couplage thermo élastique est filtrée et la mesure devient plus exacte. L'évolution de la dissipation thermique est schématisé sur la figure 2.

Trois phases différentes peuvent être distinguées, une première phase d'augmentation qui n'excède pas 20 % de la durée de vie et qui correspond à l'apparition de fissures transverses dans la matrice, une deuxième phase de « stabilisation » correspondant à 5000 cycles de la durée d'un essais de fatigue, où l'endommagement évolue de façon continue, ce qui lié à la multiplication et à la propagation des fissures transverses dans la matrice jusqu'à atteindre la densité critique l'endommagement croît rapidement ce qui correspond à la rupture des fibres et au délaminage du composite.

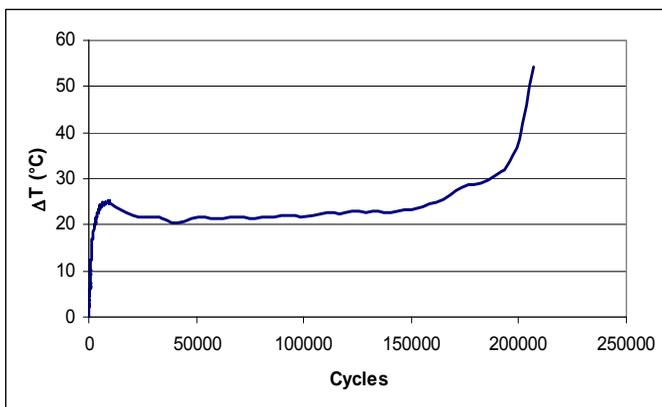


Figure 2 Mesure par thermographie infrarouge de l'évolution du différentiel de température d'éprouvettes trouées orientées à 45° soumises à un essai de fatigue (60 % de la charge à rupture)

3. Application de la thermographie infrarouge à la détermination de la limite d'endurance

Pour déterminer la limite d'endurance du matériau, nous avons mené une campagne d'essais sur des éprouvettes trouées orientées à 45°. Pour chaque essai, nous avons mesuré la température de stabilisation qui correspondait à la température mesurée au bout de 10000 cycles.

Pour les essais ne dépassant pas 10000 cycles, la température de stabilisation est considérée au niveau du point d'inflexion de la

courbe d'évolution de la température. Nous avons laissé l'essai se poursuivre jusqu'à la rupture de l'éprouvette ou jusqu'à la limite de 100000 cycles pour pouvoir tracer une courbe de Wöhler. Les relevés de l'évolution de ΔT pour différents cas de charges sont présentés sur la figure 3.

En relevant pour chacun des essais le ΔT représentatif du premier endommagement, nous pouvons tracer la courbe qui nous permettra d'obtenir une estimation de la limite d'endurance (figure 4).

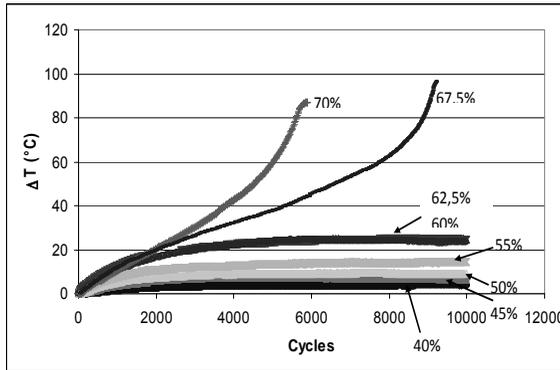


Figure 3 Mesure du palier de stabilisation de la température pour différents cas de charge à partir de plusieurs éprouvettes à 45° trouées

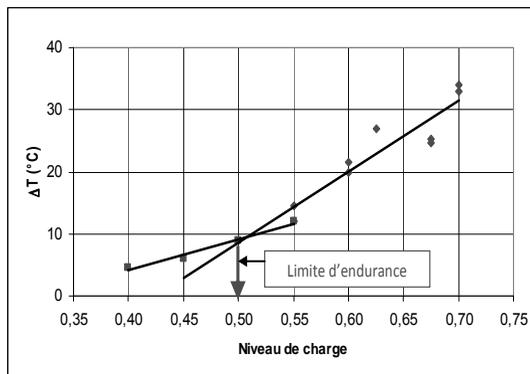


Figure 4 Evaluation de la limite d'endurance du composite étudié par thermographie infrarouge à partir de plusieurs éprouvettes à 45° trouées

La répartition des points de mesure peut être approximée par deux droites. La limite d'endurance est définie au niveau de

l'intersection des deux segments, ce qui correspond pour notre matériau à 50 % de la charge à rupture. En reportant maintenant pour chaque essai réalisé le nombre de cycles supporté en fonction du taux de charge, on peut tracer une courbe S-N (figure 5) et en déterminer traditionnellement la limite d'endurance du matériau.

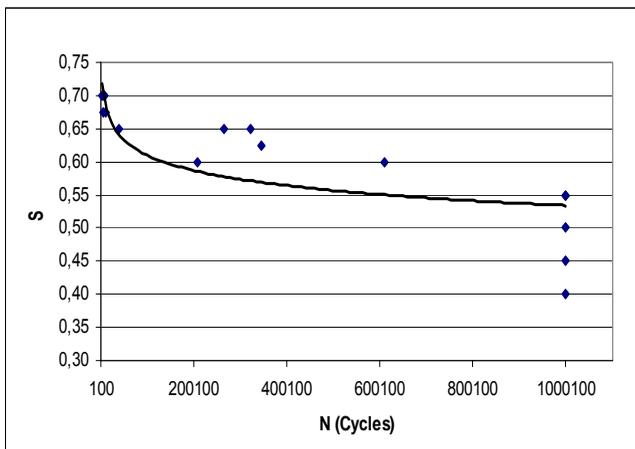


Figure 5 Tracé de la courbe (S-N) des éprouvettes 45° trouées

L'exploitation de la courbe de Wöhler fait apparaître une limite d'endurance à 53 % de la charge à rupture des éprouvettes trouées. Cette limite "mécanique" de 53 % est très proche de la limite "thermique" à 50 %, ce qui permet de dire que les deux méthodes de détermination sont très analogues. Il paraît donc intéressant d'approfondir la démarche thermographique qui, contrairement à la démarche de Wöhler, ne nécessite que la détermination des paliers de stabilisation et non le nombre de cycles à rupture. Cette approche doit donc être plus rapide.

4. Application de la thermographie infrarouge à la détermination de la limite d'endurance avec une seule éprouvette

Dans un souci de gain de temps et afin de minimiser le nombre des éprouvettes, nous avons envisagé de déterminer la limite d'endurance d'une éprouvette en n'effectuant qu'un seul essai. Pour cela nous avons décidé de solliciter notre éprouvette par palier successifs de 10000 cycles en augmentant la charge à chaque palier (figure 6).

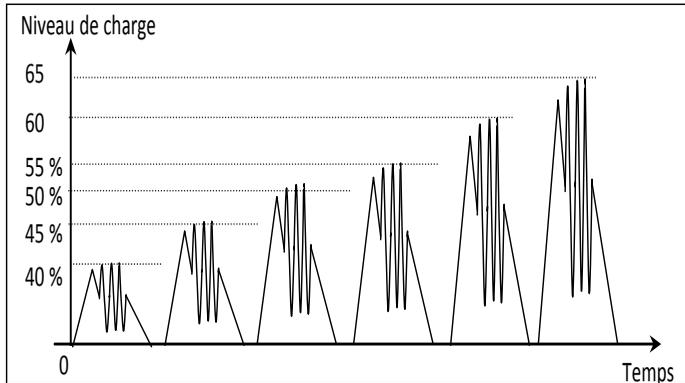


Figure 6 Essai à palier croissant éprouvette 45° trouée

Les essais de fatigue ont été réalisés sur une éprouvette trouée orientées à 45°. Pour chaque essai, nous avons mesuré la température de stabilisation qui correspondait à la température mesurée au bout de 10000 cycles. Les essais ne dépassant pas 10000 cycles, la température de stabilisation est considérée au niveau du point d'inflexion de la courbe d'évolution de la température. Les essais ont été réalisés à une fréquence de 10 Hz entre 40 % et 65 % de la charge à la rupture (figure 6). Le passage d'un niveau de charge à un autre se fait sans que l'éprouvette ne soit démontée. Les relevés de l'évolution de ΔT pour différents cas de charges sont présentés sur la figure 7.

Nous pouvons déjà constater que les courbes obtenues avec une seule éprouvette sont très semblables à celles obtenues avec sept éprouvettes (figure 3). Nous pouvons alors, à partir de ces relevés, reprendre la démarche précédente et tracer la courbe qui nous permettra d'obtenir une estimation de la limite d'endurance (figure 8).

Les résultats que nous obtenons sont très satisfaisants, ce qui montre qu'à partir d'une seule éprouvette et en utilisant une caméra infrarouge une première estimation de la limite d'endurance d'un matériau peut être déterminée.

La limite d'endurance obtenue par cette méthode (51 %) est très proche des deux premières valeurs; 53 % à partir de la courbe (S-N) et 50 % avec une éprouvette par niveau de charge.

L'utilisation de cette méthode permet un gain considérable dans le temps des essais de fatigue et le coût diminue d'une façon considérable.

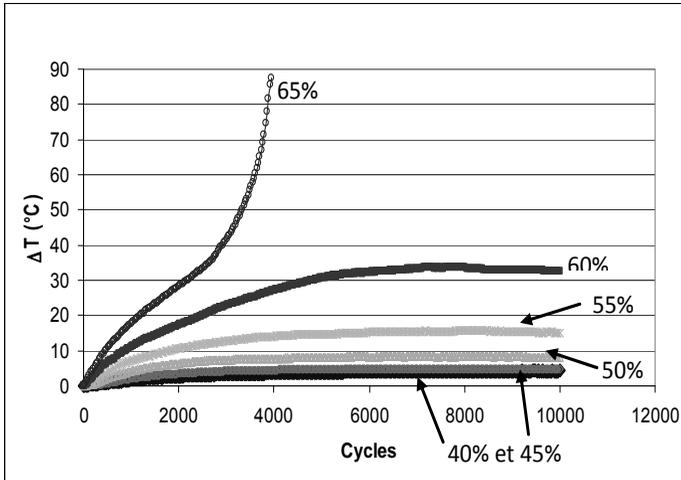


Figure 7 Mesure du palier de stabilisation de la température pour différents cas de charge à partir d'une seule éprouvette 45° trouée

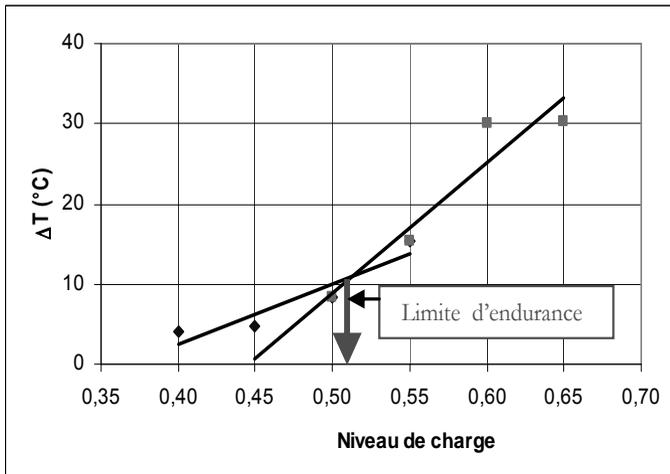


Figure 8 Evaluation de la limite d'endurance du composite étudié par thermographie infrarouge à partir d'une seule éprouvette à 45° trouée

5. Conclusion

Cette étude est destinée à mettre en évidence la relation entre la dissipation de chaleur et l'endommagement des composites. Les différentes comparaisons des résultats ont montré que, la thermographie infrarouge est un bon moyen de mesure sans contact pour suivre l'endommagement d'un composite. Les évolutions des températures correspondent bien aux évolutions de l'endommagement du matériau, et cet outil peut maintenant permettre une détermination rapide de la limite d'endurance du matériau, en n'utilisant qu'un petit nombre d'éprouvettes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Toubal, L., *Approches analytique et expérimentale de l'endommagement par fatigue d'un composite carbone/époxy*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2004.
- [2] Chrysochoos, A., *Infrared thermography, a potential tool for analysing the material behavior*, Mécanique & Industries, Vol.3, pag. 3-14, 2002.
- [3] Brémond, P., Potet, P., *Lock-In Thermography: A tool to analyse and locate thermo-mechanical mechanisms in materials and structures*, Thermosense XXIII, April 2001.
- [4] Luong, M.P., *Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique*, Mechanics of Materials, 28 pag. 155-163, 1997.

Prof. Dr. Moussa KARAMA
Directeur de la recherche
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, France
Email: moussa.karama@enit.fr