

Estimation accélérée des performances en fatigue des matériaux et structures composites thermoplastiques par le suivi de leur auto-échauffement

L. MULLER⁽¹⁾, J.-M. ROCHE⁽¹⁾, A. HURMANE⁽¹⁾, C. PEYRAC⁽²⁾, L. GORNET⁽³⁾

⁽¹⁾ ONERA DMSC, laura.muller@onera.fr, jean-michel.roche@onera.fr, antoine.hurmane@onera.fr

⁽²⁾ CETIM Senlis, catherine.peyrac@cetim.fr

⁽³⁾ École Centrale de Nantes, laurent.gornet@ec-nantes.fr

Résumé

Les essais de fatigue réalisés industriellement sont utilisés pour obtenir la limite de fatigue d'un matériau, définie comme la contrainte en dessous de laquelle le matériau ne rompra pas sous l'effet de la fatigue. Cependant, de tels essais nécessitent des campagnes expérimentales de plusieurs mois, ainsi que de nombreuses éprouvettes à tester. L'alternative qu'on se propose d'étudier ici, les essais d'auto-échauffement, consiste à relier cette limite de fatigue à une variation du comportement thermique du matériau. Les avantages considérables de ces essais par rapport aux essais de fatigue conventionnels sont que leur durée est largement réduite (de l'ordre de la journée) et qu'ils ne requièrent qu'un seul échantillon. L'enjeu de la thèse est de valider cette approche pour les matériaux composites thermoplastiques, ce qui implique, entre autres, une compréhension plus solide des phénomènes thermiques en jeu lors de leur endommagement par fatigue, une meilleure maîtrise des conditions et des données expérimentales, et la mise en place d'une approche couplée essai / modèle permettant d'estimer les performances en fatigue de ces matériaux.

Mots clés : Fatigue ; auto-échauffement ; composite thermoplastique ; modèle de durée de vie.

1. Introduction

Un matériau soumis à un chargement répété peut arriver à rupture, même si sa sollicitation cyclique est d'amplitude inférieure à sa limite statique : ce phénomène est appelé fatigue. L'endommagement d'un matériau par effet de fatigue est un phénomène important à comprendre dans le monde de l'industrie, où de nombreuses pièces sont soumises à des chargements cycliques modérés. Un essai de fatigue classique consiste à cycliser un grand nombre d'éprouvettes à fréquence et rapport de charge fixes. Chaque éprouvette est alors fatiguée pour une contrainte moyenne donnée jusqu'à rupture, et l'ensemble des données sont rassemblées dans un graphique, dit « courbe de Wöhler », indiquant le nombre de cycles menant à rupture pour chaque contrainte moyenne testée. Il apparaît pour certains matériaux une asymptote horizontale aux basses contraintes : à ces faibles niveaux de sollicitations, le matériau semble pouvoir être cyclé à l'infini, sans jamais rompre sous l'effet de la fatigue. Cette asymptote est appelée limite de fatigue, très utilisée pour dimensionner des structures.

Cependant, l'obtention d'une courbe de Wöhler nécessite des campagnes expérimentales de plusieurs mois, et est très coûteuse en éprouvettes. L'alternative ici étudiée est l'essai d'auto-échauffement qui consiste à appliquer quelques milliers de cycles de fatigue à une éprouvette, pour un rapport de charge fixé et une fréquence donnée, et de répéter l'opération pour des valeurs croissantes de contrainte. Lors de chaque palier, l'échauffement de l'éprouvette, enregistré au moyen d'un thermocouple ou d'une caméra infrarouge, tend à se stabiliser. Le tracé des valeurs d'échauffement stabilisé en fonction du niveau de contrainte maximale constitue la courbe d'auto-

échauffement de l'éprouvette. Pour les plus faibles niveaux de contrainte, la température stabilisée reste constante ou augmente faiblement : cet échauffement est lié aux propriétés viscoélastiques du matériau. Puis, pour des niveaux de contraintes plus élevés, l'échauffement s'accélère, avec des valeurs stabilisées qui continuent de croître d'un palier à l'autre : ce changement de comportement thermique peut s'expliquer d'une part par une éventuelle modification des propriétés visqueuses de la résine et d'autre part par l'apparition d'un endommagement de fatigue. La valeur seuil de contrainte à partir de laquelle cette « rupture » de comportement thermique se produit a été comparée et identifiée à la limite de fatigue déterminée par les courbes de Wöhler dans le cadre des matériaux métalliques [1], composites stratifiés d'UD [2,3] et composites thermoplastiques à fibres courtes [4]. Si ce lien est avéré, les essais d'auto-échauffement permettraient donc aux industriels de déterminer rapidement la limite de fatigue d'un matériau avec une seule éprouvette.

2. Prise en main du sujet : ré-exploitation de données existantes

Dans la lignée des études récentes menées à l'Onera [5], le démarrage de la thèse a consisté à ré-exploiter des essais d'auto-échauffement effectués sur des matériaux composites thermodurs tissés carbone/époxy, instrumentés par une caméra infrarouge FLIR X6540sc permettant le suivi de l'échauffement de l'éprouvette, un capteur de déplacement LVDT et un capteur acoustique. Le but était de faire un premier bilan sur l'instrumentation qu'il sera pertinent de mettre en œuvre sur les essais futurs et d'identifier les différents indicateurs de l'endommagement de fatigue.

2.1 Suivi thermique

L'exploitation des données thermiques a permis de vérifier que l'éprouvette s'échauffe jusqu'à atteindre une valeur stabilisée, et que cette valeur stabilisée diffère selon le niveau de contrainte appliquée (Figure 1, gauche et milieu). La courbe d'auto-échauffement présente une allure similaire à celles des matériaux métalliques et composites stratifiés, permettant d'identifier les deux régimes de comportement thermique évoqués dans l'introduction (Figure 1, droite).

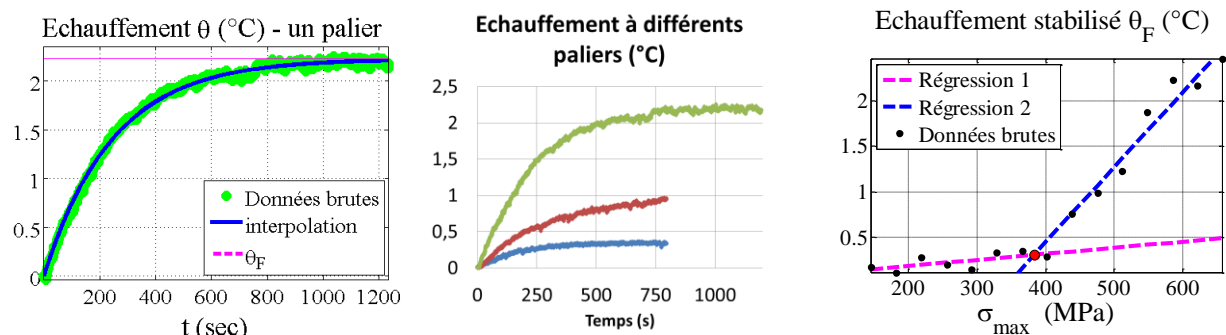


Figure 1. Auto-échauffement d'une éprouvette composite carbone/époxy tissée 2D pour un niveau de charge donné et estimation de l'échauffement final stabilisé (gauche). Variations observées d'un palier de charge à l'autre (milieu). Courbe d'auto-échauffement et identification d'une valeur de contrainte seuil (droite).

2.2 Suivi mécanique

Le calcul de l'aire des boucles d'hystérésis (contrainte-déformation) relevées lors des cycles de fatigue permet d'estimer la dissipation mécanique du matériau durant le cycle de fatigue considéré (Figure 2), à comparer avec la dissipation thermique. De plus, la pente de la droite reliant les deux extrémités des boucles d'hystérésis correspond au module d'Young apparent du matériau, toujours durant le cycle considéré. Le tracé de ce module d'Young pour tous les cycles de tous les paliers nous donne une bonne indication sur l'évolution des propriétés élastiques du matériau au

cours de l'essai: le module reste d'abord quasiment constant avant de chuter lors des plus hauts niveaux de contraintes (Figure 3). Il serait intéressant de vérifier si la chute du module d'Young correspond à l'élévation conséquente de l'échauffement de l'éprouvette, reliée à une propagation plus importante de l'endommagement.

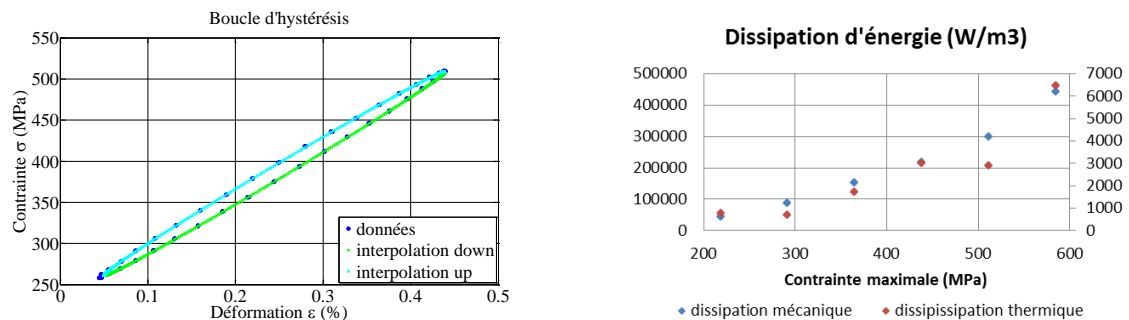


Figure 2. Exemple d'une boucle d'hystérésis pour un palier de charge donné (gauche). Estimation de l'énergie mécanique dissipée (droite, en bleu) et comparaison avec l'énergie thermique dissipée (droite, en rouge).

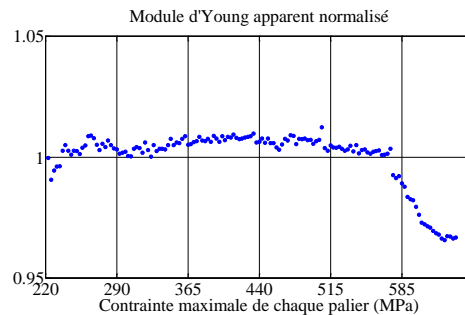


Figure 3. Suivi du module d'Young apparent normalisé en fonction de la contrainte.

2.3 Suivi acoustique

Le capteur acoustique permet de relever l'énergie sonore dégagée par les différents endommagements apparaissant pendant l'essai. L'énergie cumulée et les valeurs de contraintes auxquelles sont apparus les événements acoustiques sont tracées sur la Figure 4.

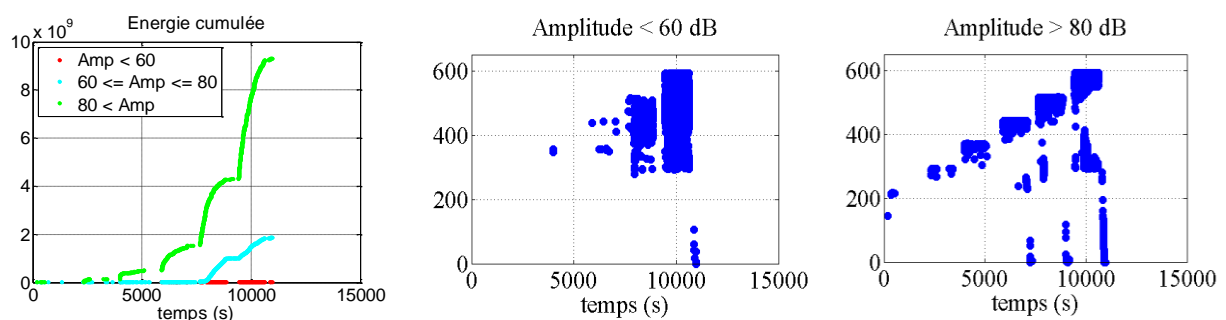


Figure 4. Suivi acoustique de l'essai d'auto-échauffement : énergie cumulée (gauche) ; identification des événements de faible amplitude (< 60 dB, milieu) et de forte amplitude (> 80 dB, droite).

Une première tentative de filtrage des données d'émission acoustique a permis d'observer que les signaux de faible amplitude sont émis uniquement dans les derniers paliers, tandis que les signaux à forte amplitude se produisent au niveau des contraintes maximales de chaque palier. Une hypothèse à confirmer serait que les événements de faible amplitude sont associés à du frottement, générant de la chaleur mais peu d'énergie sonore, les événements de forte amplitude signant quant à eux des ruptures de fibres générant peu de chaleur au moment de leur occurrence.

3. Perspectives immédiates

Le cœur de la thèse portera sur l'auto-échauffement de composites thermoplastiques PA66 fibres de carbone, UD et tissés 2D. Trois types d'essais sont envisagés :

- **Essais de caractérisation par DMA (*Dynamical Mechanic Analysis*)**

Le but de ces essais est d'améliorer la compréhension du comportement thermique et visqueux du matériau thermoplastique soumis à des sollicitations dynamiques non-endommageantes de très basse amplitude, engendrées par la DMA. L'auto-échauffement de l'échantillon est suivi par la caméra infrarouge ou un thermocouple. Des essais seront d'abord effectués sur des éprouvettes saines afin de mettre en évidence l'influence de plusieurs paramètres expérimentaux tels que la fréquence de cyclage, la température ambiante, voire le taux d'humidité. Dans un second temps, ces mêmes essais seront effectués sur des éprouvettes pré-endommagées par des essais mécaniques statiques interrompus à différents niveaux de charge, afin de corréliser l'auto-échauffement du matériau à son niveau d'endommagement.

- **Essais d'auto-échauffement multi-instrumentés sur machine mécanique hydraulique**

Sur la base des conclusions issues des précédents essais, des essais d'auto-échauffement seront effectués. Les différents indicateurs, introduits dans le paragraphe 2, seront estimés. En outre, la correspondance entre les essais DMA et les essais d'auto-échauffement sera étudiée attentivement. Une fois maîtrisés, autant dans leur mise en œuvre que dans leur exploitation, ces essais pourront être confrontés aux prévisions de modèles de durée de vie développés en interne. L'enjeu à terme sera de reconstruire numériquement les courbes de Wöhler et de déterminer une limite de fatigue.

D'autres essais d'auto-échauffement pourront, de plus, être envisagés : chargement aléatoire, amplitude de cycles constante (i.e. rapport de charge non constant) ou sollicitation de pièces réelles, l'usage d'une caméra infrarouge plutôt qu'un thermocouple prenant ici tout son sens.

- **Essais de fatigue conventionnelle sur machine mécanique hydraulique**

Dans le but de comparer les valeurs de contrainte seuil identifiant des changements de comportement thermique à des limites de fatigue issues de courbes de Wöhler complètes, des essais à plusieurs millions de cycles seront enfin mis en œuvre. Ils serviront également à valider les prévisions issues des modèles.

Références

- [1] C. Doudard, Détermination rapide de la limite d'endurance d'acier, Thèse, Université de Bretagne Occidentale, 2003
- [2] C. Colombo, F. Libonati, F. Pezzani, A. Salerno, L. Vergani, Fatigue behaviour of a GFRP laminate by thermographic measurements, 2011
- [3] O. Westphal, Analyse thermomécanique de l'endommagement en fatigue de stratifiés carbone/époxy : détermination de la limite d'endurance à partir d'essais d'auto-échauffement, Thèse, École Centrale Nantes, 2014
- [4] L. Jégou, Caractérisation rapide des propriétés en fatigue d'un polymère renforcé par des fibres courtes, pour une application automobile, Thèse, Université de Bretagne Occidentale, 2012
- [5] G. Bai, Évaluation par Vibrothermographie de l'Endommagement de Composites Tissés, Thèse, ONERA, 2016