

## RÉSUMÉ

**Nom : BALE**  
**Prenom : Jefri**  
**N° Etudiant : 31021881**  
**Ecole Doctorale ED 139 Connaissances, Langages, Modélisation**  
**EA 4416 Laboratoire d'Énergétique Mécanique et d'Électromagnétisme**

**Titre de la thèse : Observation de l'endommagement de matériaux composites par la méthode de contrôle non destructif (C.N.D)**

À ce jour, les matériaux composites sont de plus en plus employés en remplacement des matériaux métalliques pour la réalisation de pièces structurelles car ils permettent l'allègement des produits tel que les automobiles ou les avions. L'excellente rigidité et résistance en particulier ceux renforcés avec de la fibre sont très attrayants pour certains secteurs manufacturiers. Les propriétés des composites renforcés de fibres dépendent de certains nombres de paramètres tels que les paramètres du matériau: la fraction volumique de fibres, la matrice de fibres adhérence, l'orientation des fibres, etc et les paramètres d'expérimental : spécimen forme, l'utilisation de pattes pour les essais, la vitesse d'essai, et les conditions de charge.

La plupart des composantes d'automobile finira par échouer de la fatigue causée par la flexion répétée de chargement et de ne pas être en mesure de remplir la fonction comme il se doit et peut causer des ruptures. Les matériaux composites présentent des mécanismes de l'endommagement très complexes en fatigue en raison des caractéristiques anisotropes dans leur résistance et rigidité. Il existe quatre mécanismes de l'endommagement dans les matériaux composites résultant de la fatigue: fissuration de la matrice, le délaminage, la rupture des fibres et un décollement interfacial. Dans l'utilisation pratique de la structure composite en tant que composant de l'automobile, des discontinuités géométriques, comme des évidements et des trous sont un élément important des opérations d'usinage en vue de faciliter le montage du composant composite telles que assemblage des joints vissés

et rivetés parce que les composites ne peuvent pas être soudés directement comme matériaux métalliques à vérifier l'intégrité structurale des produits composites complexes. Du point de vue mécanique, le trou a tendance à provoquer une concentration de contrainte dans les zones adjacentes à la limite du trou, et de réduire les capacités de charge qui transportent des produits. Par conséquent, il est important de prendre note de cette sensibilité à l'entaille lors de la conception des trous de boulons, des joints ou des découpes.

Nombreuses méthodes ont été impliquées dans le suivi et l'observation des mécanismes d'endommagement des matériaux composites qui est aggravée par le fait que les endommagements ne sont pas visibles à l'œil nu et peut se produire dans de nombreuses formes différentes. En ce qui concerne la sécurité de l'exploitation de structures de pièces en composites, les plus importants sont les caractéristiques, décrivant l'apparition et le développement des fissures sous l'effet des charges statiques et dynamiques. En général, l'endommagement en fatigue des composites à matrice de polymère a lieu dans le composite, sans fissuration macroscopique, à l'exception de la rupture finale. Au niveau microscopique, l'endommagement de fatigue des composites se produit invariablement par une microfissuration de la résine, suivie par interfaces de microfissures et l'endommagement final des fibres de renforcement. Par conséquent, la surveillance et le diagnostic de la détection précoce de ces diverses formes de propagation des endommagements nécessitent l'application d'un procédé sans contact de fonctionnement en temps réel, c'est à dire non destructif. Contrôle non destructif (CND) est une méthode de suivi et d'observation qui est largement utilisée dans le domaine composite de comprendre comment les endommagements initier et développer jusqu'à la rupture. La méthode de CND celle utilisée dans notre étude sont la thermographie et soutenu par émission acoustique et la tomographie.

Cette recherche fait partie d'un projet de collaboration de PSA Peugeot Citroën en France avec le laboratoire LEME de l'Université de Paris Ouest Nanterre-La Défense. Ce projet est une initiative de recherche industrielle et universitaire financé

conjointement pour étudier le comportement de l'endommagement de unidirectionnel composite de fibre de verre (*GFRP*) et discontinue de fibre de carbone composite (*DCFC*) selon la méthode de l'observation CND. Le travail présenté dans cette thèse se concentre sur les méthodes des non destructifs de la thermographie soutenus par émission acoustique et la tomographie comme outils d'observation pour les mécanismes d'endommagement de *GFRP* et *DCFC* en traction (statique et fatigue). Cette approche vise à établir une corrélation entre les résultats en vue d'obtenir une représentation plus fiable et précise du comportement de l'endommagement de la fibre composite. En outre, la détermination de *HCFS* (*high cyclic fatigue strength*) et la courbe S-N basée sur la méthode de thermographie a également décrit dans cette étude. À la connaissance de l'auteur, tous les résultats sont contribution significative sur les caractéristiques des endommagements de matériau composite *GFRP* et *DCFC* que utilisés dans cette étude.

Cette étude a utilisé une forme rectangulaire et se compose d'échantillons avec et sans encoches circulaires (trous) dans le centre. La vitesse de déplacement constante est appliquée pour observer l'effet sur le comportement des endommagements sous une charge de traction statique. Sous les essais de fatigue, le paramètre constant de la fréquence et de l'amplitude de stress a été étudiée pour chaque niveau de charge pour avoir les propriétés de fatigue et évolution de l'endommagement de l'échantillon. La tomographie a été utilisée pour confirmer l'apparition d'endommagement et condition matérielle après essai de fatigue.

Sous l'essai de traction statique de *GFRP* 90 ° (sens des fibres perpendiculaire à l'orientation de chargement) avec et sans trou, La courbe contrainte - déformation représente relation linéaire qui indique clairement le comportement fragile typique avec la défaillance soudaine du matériau composite dans des conditions statiques charge de traction. Il n'y avait aucune justification claire de la non-linéarité dans les courbes contrainte-déformation.

En général, il n'y a pas de différents mécanismes d'endommagement entre *GFRP* 90° trou et sans trou. L'endommagement de *GFRP* 90° en tension est

relativement simple en un comportement fragile avec une surface de fracture transversale perpendiculaire à la direction de la charge appliquée. Par conséquent, lors de la rupture finale de l'échantillon, il n'y a pas de changement permanente de la forme rectangulaire d'origine de l'échantillon pendant le test, et donc aucune ductilité. L'endommagement d'initiation se présente sous forme de fissures émanant en raison de fissuration de la matrice que aligné sur la direction des fibres. Ce premier endommagement de fissuration de la matrice se produit en raison de la charge est répartie plus élevé de matrice qui dépasse la résistance à la rupture de la matrice. Etant donné que dans cette orientation des fibres qui plupart perpendiculaire à la direction de chargement, les fibres transportent très peu ou pas du tout de charge et la matrice à dominante transporte la charge.

Il a été observé que, après un endommagement initial, les échantillon ont continué à maintenir la charges sous l'augmentation des déplacements. Par la suite, fissuration de la matrice puis pénètre dans l'interface entre les fibres et la matrice et provoque une l'apparition de fibre / matrice décollement. Le décollement se produit généralement lorsque la fibre / matrice n'a pas été distribué uniformément dans les stratifiés et pourrait être due à la faiblesse de l'interface entre fibre et matrice. De l'observation de la rupture de l'échantillon, on a confirmé l'émergence de les mécanismes d'endommagement de la division ou de rupture interfaciale et qui se propagent en la zone visible d'endommagement jusqu'à l'extrémité de la largeur latérale de l'échantillon. Ce mécanisme d'endommagement causés par fissuration de la matrice et de la présence de propagation de l'orientation des fibres parallèlement à la direction de chargement. Il a précédemment été observé que lors de la deuxième étape, une fissure de la matrice atteint une fibre peut se propager le long de l'interface, si la fibre est parallèle à l'axe de traction. La combinaison de ces les mécanismes d'endommagement peut réduire la rigidité et la capacité des stratifiés dans l'exercice ou transférer la charge. Dans la phase finale de la propagation d'endommagement, lorsque le point critique a été atteint, la zone endommagée atteint à la fin de largeur de l'échantillon et finalement échoué en raison principalement à la

rupture des fibres. Cela signifie que la fibre dans les stratifiés n'est plus capable de détenir ou de porter l'augmentation de charge donnée et l'endommagement s'est produit complètement.

Une caméra infrarouge (IR) est utilisée pour mesurer la variation et l'évolution de la température pendant l'essai. Plusieurs pics de température sur la surface de l'échantillon ( $\Delta T \approx 0,6^\circ\text{C}$ ) qui détectent par la caméra infrarouge sont liées à la présence de l'endommagement en macro. En cas de l'endommagement, il représente l'énergie qui a libéré progressivement. L'énergie qui a été absorbée est suffisante pour créer macro-fissure, l'élargissement des pré-existantes, et aussi de créer de nouvelles fissures de surface. La chaleur générée par la libération d'énergie, alors détecté par la caméra IR a montré que l'augmentation de la température dans la zone endommagées. Chacun des pics de température est indiquer le différents types d'endommagement en macro. Nous avons constaté que  $\Delta T \approx 0,9^\circ\text{C}$  est directement associer avec l'apparition de la fissuration macro de la matrice et  $\Delta T \approx 1,3^\circ\text{C}$  est liée à l'apparition d'endommagement de l'interface ou de la séparation. La température plus élevée de la séparation est en fait due à absorber plus d'énergie d'endommagement. De l'évolution de la température au cours de l'essai de traction, la présence d'endommagement en indique la zone de rupture finale, qui est exister et se concentrer sur la région de la zone de rupture. En somme, le premier des endommagement en macro provoque l'apparition d'une catastrophique de l'échantillon qui induisent le plus haut sommet de la température à  $\Delta T = 37^\circ\text{C}$ .

Le mode de chaque direction des fibres de l'échantillon *GFRP* avec trou n'a été constaté différemment. L'enquête de la concentration des contraintes autour du trou de *GFRP*  $0^\circ$  (fibre direction parallèle à la direction de chargement) a constaté que la répartition des contraintes résultant plus faible concentration de contraintes dans la zone le long du trou sous traction essais statiques. Le mécanisme d'endommagement de *GFRP*  $0^\circ$  avec trou peut être attribué à la combinaison d'effets de matrice, la fibre-matrice décollement et la rupture des fibres. D'après les résultats d'observation, les premiers endommagement de la matrice macro-fissuration se présente sous forme de

séparation et indique par un bruit de craquement aussi. Après la première endommagement de la matrice qui ont lieu au niveau du bord du trou, l'endommagement a été développé dans un autre mécanisme d'endommagement jusqu'à la largeur latérale de l'échantillon. Le nouvel endommagement de la matrice macro-fissuration peut entraîné par fibre-matrice décollement et l'endommagement peut se propager le long de l'interface fibre-matrice et montrant «*brush like*» l'endommagement qui indiquent l'interface faible. Les autres détails des mécanismes d'endommagement de la matrice de faisceaux de fibres décohésion dans le sens transversal également trouvé dans presque tous les domaines de la surface de l'échantillon jusqu'à ce que les deux côtés de la zone de patte. Le faisceau de l'endommagement de la fibre dans la direction transversale se produit sur le modèle fragile qui montre l'existence de la fibre dans cette direction. La cause de la rupture finales changements dans la forme du trou dans le trou plus étirement dans la direction de la charge de traction.

Afin de suivre l'évolution de la température en termes d'endommagement apparition au cours de l'essai, le profil de point est utilisé à plusieurs domaines de la surface de l'échantillon à avoir tous les changements de la température maximale jusqu'à la rupture final. De l'observation de la thermographie, il a également été détecté que l'endommagement s'est produite parallèlement à la direction des fibres dans le modèle fragile et dominée par décohésion matrice de fibres et de fibres sortir. Les profils de température pour la zone sans endommagé ou de la zone qui ont soutenu la propagation de la déformation inférieure n'a pas de caractéristique de coup augmentation de la température aussi connu que l'identité d'endommagement. La zone d'endommagement et la propagation d'endommagement expériences augmenter soudainement de la température et atteint le point de  $\Delta T$  supérieur. Au cours d'un essai de traction, la formation de fissures dans la matrice et la rupture des fibres conduit à une impulsion de chaleur qui peut être observé à la surface. Chacun des pics de température est indiquer le différent type des premières d'endommagement en macro . Nous avons constaté que  $\Delta T \approx 2 \text{ }^\circ\text{C} - 7 \text{ }^\circ\text{C}$  est associé à l'apparition et la

propagation de macro fissuration de la matrice et l'endommagement d'interface ou de la séparation dans la direction transversale.  $\Delta T$ -dessus de  $\approx 10^\circ \text{C}$  est liée à l'apparition de la rupture des fibres et retrait de la fibre à une rupture d'interface période finale de propagation des endommagements.

Des essais de fatigue de *GFRP*  $90^\circ$  ont été effectuées pour plusieurs niveaux de contrainte sur la base de la contrainte ultime à la traction (*UTS*) avec l'intervalle de 40% à 65% de *UTS*. Les essais de fatigue tension-tension contrôlés charge d'amplitude constante ont été effectués avec d'autres paramètres de l'essai de fatigue choisis étaient forme d'onde sinusoïdale, 3 Hz de fréquence et le ratio de contrainte de 0,1. La charge de fatigue, lorsque les échantillons ont survécu à 1 million de cycles est désignée comme *high cyclic fatigue strength* (*HCFS*) dans le présent rapport. Les niveaux de stress maximum ont ensuite été choisis pour donner une intervalle de durées de vie (*Nf*) entre  $10^3$  et  $10^6$  cycles.

La courbe de S-N de *GFRP*  $90^\circ$  basé sur le stress normalisé (stress fatigue en traction maximale divisée par la contrainte à la traction statique) et cycles à la rupture dans le mode de contrôle du stress a été trouvé linéaire et il n'y a pas d'échec après un run-off de 2.900.000 cycles pour 40% de *UTS*. La courbe de S-N montre le déclin progressive de la résistance à la fatigue avec une augmentation du nombre de cycles de fatigue. La ligne de tendance prédit *HCFS* d'environ  $\approx 0,5$  de stress normalisée, signifie que *Nf* atteint un million de cycles lorsque la valeur de contrainte maximale est d'environ 50% de *UTS*. Par conséquent, un niveau de stress normalisé de jusqu'à environ 0,5 (environ 29 MPa) peut être considéré comme une valeur sûre pour une grande cycle de résistance à la fatigue (la contrainte correspondant à une durée de vie de  $10^6$  cycles) pour ce matériau de *GFRP*  $90^\circ$ .

Dégradation de la rigidité et évolution de l'endommagement, indiquent qu'il ya trois étapes de l'évolution dans l'échantillon de *GFRP*  $90^\circ$ . Ce comportement d'endommagement est classé comme mode fragile, comme il arrive à l'essai statique fortement influencée par la matrice. La première étape de l'évolution des endommagements pourraient être causés par des micro fissures dans la matrice

initiale qui démarre direction perpendiculaire au bord du trou. Pour la deuxième étape, il est «niveau de saturation», où l'augmentation d'endommagement de la fissuration de la matrice devient relativement stable et l'émergence d'un autre mécanisme de dégradation tels que la fibre / matrice décollement et la séparation longitudinale. Dans la troisième étape, la matrice et les fibres rupture lieu qui a provoqué une rupture par séparation le long de la largeur parallèle à l'orientation des fibres.

De l'évolution de la température pendant l'essai de fatigue à la traction, la présence d'endommagement a été indiquée par le changement de température sur la surface de l'échantillon pendant l'essai qui existent et se concentrent au niveau du trou. Pendant ce temps, l'évolution de la température à une autre zone de surface du spécimen que loin du trou n'ont pas montré une augmentation de température ou par rapport à la même température à partir du début de l'essai jusqu'à ce que la rupture de l'échantillon. L'évolution de la température peut être classée en quatre étapes. Dans la première partie, l'augmentation initiale de la température est peut-être en raison des micro-fissures dans la matrice. Dans la deuxième partie, une augmentation soudaine de la température causée par la première apparition de la fissuration de la matrice macro. Après cela, la température atteint une tendance de plus en plus lentement en raison de l'augmentation stable de la fissuration de la matrice en tant que partie de la troisième phase. La partie finale, une augmentation tendancielle de la température pourrait être due à fibre / matrice décollement comme la rupture d'interface en forme de séparation et finalement provoque l'apparition de la rupture de la fibre traitée avec laquelle la rupture de l'éprouvette.

Analyse rapide de résistance à la fatigue sur la base de la thermographie a également été réalisée pour déterminer l'essai haute résistance à la fatigue (HCFS), sur la base de résultats expérimentaux à l'aide de la caméra IR et de l'énergie dissipée dans une unité de volume du matériau. De l'observation de la thermographie, il y a une augmentation significative ou plus de  $\Delta T$  stable autour  $\geq 10$  fois ( $0,2$  °C- $0,8$ °C) au-dessus de 55% de *UTS* comparé à l'augmentation de l'ordre de  $0,02$  °C  $\Delta T$

stable  $0.07^{\circ}\text{C}$  sous 50% du niveau de charge. Ce niveau de charge ensuite utilisé pour classer le niveau de contrainte de ci-dessus et ci-dessous, qui montre le profil de la caractéristique bilinéaire utilisée pour cette méthode. Selon la méthode Risitano, l'cyclique haute résistance à la fatigue (*HCFS*) de matériau peut être déterminée à partir de l'intersection de profil de température  $\Delta T$  stable de différents niveau de stress obtenu en ajustant séparément les données expérimentales pour des amplitudes hautes et basses stress sur l'axe des x, respectivement (c'est pour le niveau de stress en dessous et au-dessus de la limite de fatigue attendue). Ainsi, les établissements de *HCFS* de *GFRP*  $90^{\circ}$  selon la méthode de la thermographie est de 52% de *UTS*.

En outre, une investigation de la caractérisation quantitative basée sur la dissipation d'énergie intrinsèque a été présentée pour valider et corréler les résultats de l'approche de la thermographie. Les établissements de soins est déterminée en utilisant la même procédure graphique du profil intersection bilinéaire sur la base de la technique de mesure in situ de la dissipation d'énergie. Les établissements de *HCFS* de  $\approx 47\%$  de *UTS* obtenus par dissipation de l'énergie a été trouvé ne diffère pas significative à celle obtenue en utilisant la méthode de la thermographie et aussi de courbe de Wöhler S-N. La relation entre le profil de température de stabilisation et la dissipation d'énergie lors de l'essai de fatigue peut être approchée par une fonction linéaire avec un coefficient de corrélation de données,  $R^2$  proche de 1, on peut dire que l'augmentation de la température détectée par la caméra IR à la surface de l'échantillon à la suite des dissipée thermique est en fait due à la dissipation d'énergie du matériau. Les principaux mécanismes de dégradation de *GFRP*  $90^{\circ}$  provoquant la dissipation d'énergie pourraient être attribués à l'apparition d'endommagement et la propagation de la fissuration de la matrice, l'interface de craquage / friction entre autres, et la rupture de la fibre. Méthode de thermographie qui a déterminé la courbe S-N a également présenté pour *GFRP*  $90^{\circ}$ . La courbe S-N obtenue avec la méthode de la thermographie a un bon accord avec les données expérimentales de courbe de Wöhler S-N. On peut affirmer que la méthode de la thermographie est approprié pour la caractérisation in situ de *HCFS* et la courbe S-N de matériau *GFRP*.

En outre, dans cette étude, l'analyse des caractéristiques des endommagements par l'observation CND de matériel DCFC sera discuté.

Sous essais statiques de traction, il a été constaté que le matériau DCFC trou et sans trou ont le type d'endommagement similaire lorsque endommagé comme une combinaison de deux modes d'endommagement qui se compose de la fissuration et de la forme de la délamination, La forme de craquage a été trouvé en combinaison de chip décollément craquage perpendiculaire à l'axe de la charge. En outre, le délaminage causé séparation le long de l'épaisseur que parallèlement à l'axe de charge et la longueur de chip. L'évolution des endommagements de ce matériau *DCFC* semble commencer vers la surface comme une caractéristique de la rupture fragile montré par chip / matrice décollément et la fissuration de chip. Ensuite, se propageant à travers quelques chips ensuite se transformer en un délaminage au niveau du côté épaisseur de l'échantillon jusqu'à ce que la rupture finale atteint.

Les résultats de l'observation sur la thermographie donnent une bonne détection sur le comportement insensible de DCFC selon la présence de petit trou (5mm de diamètre), avec des delta-T points qui se produisent principalement dans la section brute loin du trou. La présence de delta-T points ne peuvent pas précis pour déterminer ou de prédire la zone de rupture finale, puisque la présence de delta-T points n'ont pas une bonne indication que les initiateurs de l'apparence d'endommagement en macro qui mène à la rupture final, même que l'on trouve dans DCFC spécimen sans trou. Ce comportement n'est pas souvent à se produire comme composite de fibre traditionnelle ni matériaux isotropes lorsque l'endommagement est généralement initié par la concentration des contraintes autour du trou. La contradiction de comportement d'endommagement de ce matériau est probablement causée par des non-homogène de la forme matérielle qui ont de grandes concentrations de contraintes à la fin de la forme de chip et peut également en raison de grandes disparités de rigidité entre la résine époxy et fibre de carbone qui peut conduire à avoir une contrainte locale, comme expliqué par les auteurs précédents. Ou en d'autres termes, la concentration de contrainte de matériau intrinsèque produite

par la forme non-homogène de méso-structure locale a été trouvée supérieure à la concentration de contrainte géométrique due à la présence du trou.

Afin d'assurer des endommagements au niveau du bord du trou par isoler les effets de la concentration de contraintes internes dues à l'hétérogénéité de la matière à partir de la concentration de contrainte géométrique du trou, une investigation plus approfondie a été conduite avec un ratio constant entre le diamètre de trou et la largeur de l'échantillon (ratio  $D / w$ ) de 0.4 à échantillon rectangulaire de DCFC afin d'obtenir endommagement au niveau du bord du trou.

Au cours de l'essai, l'échantillon surface également observé par caméra infrarouge pour détecter l'évolution de la température associée à l'apparence d'endommagement et aussi le lieu lorsque l'endommagement est susceptible de se produire. Plusieurs petite augmentation de la température à la surface de l'échantillon sont en mesure de détecter par caméra infrarouge à différents moments qui se produit à la zone aléatoire sur la surface de l'échantillon avant une catastrophique ou la rupture finale. L'utilisation de termes de «delta-T spots», l'augmentation de la température varie en taille, le lieu et l'intensité. Tout le delta-T points sont catégoriser comme faible ou intense petite augmentation de température qui ont  $\Delta T$  entre de 0.4 à 0.6°C. En dehors de cette faible intensité de delta-T points, caméra infrarouge détecte également élevé intense ou plus l'augmentation de température qui situent autour de lui les pattes. Vu la delta-T points évolution locale, il a clairement indiqué que la plupart des delta-T points n'ont pas conduit à déterminer l'emplacement final de la rupture. La présence des premiers delta-T points éventuellement met en évidence des propriétés mécaniques inférieures provenant de défauts de fabrication ou de la nature de chips non homogène. En conséquence, ce début des delta-T points semblent représenter que des endommagement locaux sporadiques, qui ne poussent ni fusionnent pour former l'endommagement macro.

Afin de suivre l'évolution de la température au cours de l'essai, quatre sous-domaines définis à l'échantillon: un sur chaque bord du trou et l'autre à proximité des serre-joints. Toute la surface de la température qui détectent par caméra infrarouge

varient entre 0.3 à 1.4°C.  $\Delta T$  de plus de 0.7°C sont clairement montrés par plusieurs pics de delta-T place avant la rupture ou catastrophique. Lorsque la rupture finale, et soudainement  $\Delta T$  atteint jusqu'au le plus élevée point de 28°C à le lieu de l'endommagement. La rupture finale se produit au niveau du bord du trou qui démontre que le diamètre du trou utilisé pour cette étude est suffisamment pour produire une concentration de contraintes telles que les contraintes dans la région éloignée du trou peuvent être négligés.

L'investigation expérimentale sur le comportement en fatigue des *DCFC* a également été menée. L'observation de la thermographie s'applique pour détecter la distribution de température sur la surface de l'échantillon lors des essais. L'objectif est de déterminer l'évolution d'endommagement par rapport au nombre de cycles en faisant varier le niveau de contrainte appliqué. Dans la pratique, les endommagements sont observés par deux systèmes. Le premier consiste à suivre l'évolution des endommagements au cours de l'essai par la jauge de déformation et / ou de déplacement pour suivre la dégradation de la rigidité en contrôlant la désintégration continue des propriétés élastiques. Le second système consiste en une analyse sur l'observation de la thermographie. Le changement de température sera suivi d'avoir un profil de température en fonction de l'apparition et la propagation d'endommagement. De cette manière, il est possible de déterminer la relation de l'évolution d'endommagement entre les résultats expérimentaux et l'analyse de la thermographie.

La courbe S-N est presque linéaire et il n'y a pas de défaillance après un run-off de 7.500.000 cycles pour 30% de *UTS*. La courbe de S-N montre le déclin progressive de la résistance à la fatigue avec une augmentation du nombre de cycles de fatigue.. La ligne de la ligne de tendance prédit une résistance à la fatigue à cycle élevé (*HCFS*) d'environ  $\approx 0.43$ , c'est-à-dire que *N<sub>f</sub>* atteint  $10^6$  cycles lorsque la valeur de contrainte maximale est d'environ 43% de *UTS*. Ainsi, pour ce matériau *DCFC*, un niveau de stress normalisé jusqu'à environ 0,43 (environ 200 MPa) peut être

considéré comme une valeur sûre pour une résistance à la fatigue à cycle élevé (HCFS).

Durant les premiers cycles de fatigue, il se produit une augmentation rapide initial en évolution de l'endommagement (une augmentation moyenne d'environ 10% pendant les premiers 20% de la résistance à la fatigue). Par la suite, les endommagements augmentent lentement jusqu'à être proche de la rupture final. Pour les 5% de résistance à la fatigue, les endommagements augmentent soudainement et fortement à la suite d'une catastrophe finale. L'évolution des endommagements indique qu'il ya trois étapes d'évolution d'endommagements de ce matériau DCFC. le premier de micro matrice fissuration, la propagation de fissuration de la matrice, chip / matrice décollement et la fissuration chip devient stable. Dans la troisième étape, la rupture du chip lieu et qui a causé la séparation le long de l'épaisseur jusqu'à la rupture final.

Les courbes de  $\Delta T$  augmentent au cours des essais de fatigue pour tous les niveaux de stress, mais pas au même rythme. L'échantillon avec le niveau de charge de 65% montre une augmentation de la température initiale jusqu'à ce qu'il atteigne une multiplication lentement ou gentiment de l'état thermique stable (la pente étant seulement de  $0.0002^{\circ}\text{C}/\text{cycle}$ ), commencent à  $N_f$  environ 1000 cycles et cet état reste jusqu'à ce  $N_f = 12000$  cycles sans indication de l'augmentation de température qui diffère avec le profil de température pour 70% de niveau de charge. Au début, il montre à avoir le même comportement de l'augmentation de la température qui se composent d'augmentation de la température initiale et bienveillant de l'état thermique stable (avec une pente de  $0.0005^{\circ}\text{C} / \text{cycle}$  de 1000 à 10500 cycles). Après environ 105000 cycles, le profil de température pour 70% de niveau de charge commence à montrer une plus forte augmentation de la température jusqu'à ce qu'elle atteigne  $15^{\circ}\text{C}$  de  $\Delta T$  (la pente étant ici 10 fois plus élevé, à  $0.005^{\circ}\text{C}/\text{cycle}$ ) puis soudain conduire à la plus haute  $\Delta T \approx 37^{\circ}\text{C}$  à la suite de la rupture de l'échantillon. Le comportement typique de l'évolution de la température a globalement le même comportement pour le plus élevé de contrainte des essais de fatigue. Après une

augmentation rapide de quelques degrés au début de l'essai,  $\Delta T$  change avec un taux constant (respectivement  $0.0066^{\circ}\text{C} / \text{cycle}$  pour 80% de UTS et  $0.014^{\circ}\text{C} / \text{cycle}$  pour 85% de UTS) jusqu'à la rupture final où  $\Delta T$  augmente soudainement un grand nombre.

L'un des principaux objectifs de cette étude est d'obtenir une corrélation entre  $\Delta T$  augmentation et évolution de l'endommagement de ce matériau DCFC. Deux exemples de superposition de mesures de  $\Delta T$  et les résultats de la propagation des endommagements obtenu de l'évolution de module Young sont bien confirme que  $\Delta T$  est fortement liée à l'évolution de l'endommagement «*D*» pour ce matériau composite. Base sur de ces résultats expérimentaux ci-dessus, on peut dire que la réponse de  $\Delta T$  peut effectivement utilisé comme une méthode simple pour caractériser et évaluer l'évolution d'endommagement de DCFC composite soumis à un chargement de fatigue.

De l'analyse rapide de la résistance à la fatigue selon la méthode Risitano, il a été constaté que les établissements de la détermination de *HCFS* par l'approche de la thermographie peut être appliqué au matériel *DCFC* où il n'y a pas de différence significative avec les établissements de *HCFS* entraîné par l'approche de dissipation d'énergie et la courbe Wöhler S-N. La relation linéaire entre  $\Delta T$  et des moyens de dissipation d'énergie que la chaleur dissipée par la caméra IR mesuré est en fait, en raison de la dissipation de l'énergie intrinsèque de la matière qui peut être causée par des endommagements microscopiques. Dans un matériau DCFC, la dissipation de l'énergie intrinsèque pourrait être raisonnable produite par les mécanismes de concentration des contraintes inhérentes matière de comportement non-homogène et endommagements microscopiques, comme la craquage de chip, fissuration de la matrice, et l'interface de craquage entre chip et matrice.

Dans la section suivante, plusieurs conclusions sur l'observation des endommagements de *GFRP* et *DCFC* par méthode de *CND* sont :

- Observation de la thermographie par caméra infrarouge sur matériau *GFRP* peut donner une bonne information locale sur l'apparition et la propagation

d'endommagement, ainsi que le type d'endommagement, l'emplacement d'endommagement jusqu'à la rupture en fonction du profil de température.

- Thermographie peut être utilisée pour caractériser l'évolution des endommagements sur l'échantillon DCFC. Le début de détecter par thermographie sur micro défaut montre une forme d'éclairage flash de  $\Delta T$  points qui a légère augmentation de la température due à un défaut de fabrication. Une rupture finale ou la rupture de l'échantillon DCFC représentée par une augmentation soudaine de la température qui est l'objectif principal ou la plus forte augmentation de la température.

- Thermographie peut efficacement être utilisée comme une méthode simple pour caractériser et évaluer l'évolution des endommagements de *GFRP* et *DCFC* soumis à un chargement de fatigue.

- L'évolution de la température de *GFRP* en fatigue peuvent être classés en quatre étapes. Dans la première partie, l'augmentation initiale de la température est peut-être en raison des micro-fissures dans la matrice. Dans la deuxième partie, une augmentation soudaine de la température causée par la première apparition de la fissuration de la matrice en macro. Après cela, la température atteint une tendance de plus en plus lentement en raison de l'augmentation stable de la fissuration de la matrice en tant que partie de la troisième phase. La partie finale, une augmentation tendancielle de la température pourrait être due à fibre / matrice décollement comme la rupture d'interface en forme de séparation et provoque finalement l'apparition de la rupture de fibres qui traitant de la rupture de l'éprouvette représentée par la plus forte augmentation de la température.

- Le comportement typique de l'évolution de la température de *DCFC* a trois étapes de la première augmentation, augmenter lentement et augmentez jusqu'à atteindre la plus forte augmentation de température soudain.

- Thermographie peut être utilisée pour prédire le cycle élevé résistance à la fatigue (*HCFS*) et également être utilisée pour déterminer la courbe S-N de ces matériaux *GFRP* et *DCFC*.