



HAL
open science

Suivi de l'endommagement en fatigue d'un composite à renfort Interlock Carbone/Epoxy par Emission Acoustique

Joseph Henry, Zoheir Aboura, Kamel Khellil, Stéphane Otin

► **To cite this version:**

Joseph Henry, Zoheir Aboura, Kamel Khellil, Stéphane Otin. Suivi de l'endommagement en fatigue d'un composite à renfort Interlock Carbone/Epoxy par Emission Acoustique. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.207. hal-00597427

HAL Id: hal-00597427

<https://hal.science/hal-00597427>

Submitted on 31 May 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.

Suivi de l'endommagement en fatigue d'un composite à renfort Interlock Carbone/Epoxy par Emission Acoustique

Fatigue damaging analysis of a carbon / epoxy 3D layer Interlock with Acoustic Emission

Joseph Henry^{1,2}, Zoheir Aboura¹, Kamel Khellil¹ et Stéphane Otin²

1 : Laboratoire de Roberval
Université de Technologie de Compiègne – BP 20529, 60205 COMPIEGNE CEDEX
e-mail : joseph.henry@utc.fr, zoheir.aboura@utc.fr

2 : Snecma Villaroche
Rond-point René Ravaud - Réau, 77550 MOISSY-CRAMAYEL
e-mail : stephane.otin@sneema.fr

Résumé

L'émission acoustique est une technique qui a déjà prouvé son utilité dans le suivi des endommagements d'un composite. Dans cette étude, cette technique est appliquée à des essais de fatigue sur un composite interlock. Dans un premier temps, cette étude présente les signaux rencontrés lors d'un essai de traction uni-axiale. L'accent est porté ensuite sur le traitement des signaux acoustiques qui doit nous permettre de mieux appréhender les phénomènes responsables des pertes de propriété du matériau. L'originalité première de cette étude réside dans la distinction de deux branches lors de la représentation de l'énergie de chaque hit en fonction du nombre de counts. Ces deux branches sont attribuées pour la première aux phénomènes de rupture de fibres, déchaussements, qu'on retrouve sur un essai statique tandis que la deuxième correspond aux phénomènes de fatigue, notamment les frottements, mais aussi des dommages plus importants tels que des micro-flambements locaux. Ce papier s'intéresse ensuite à attribuer le rôle de chaque branche dans la perte de propriété du matériau.

Abstract

Acoustic emission is a non destructive controlling method which has proven its use in the study of the damages of composites. In this paper, this method is applied on carbon Interlock composite. First of all, this study reminds the different types of hit encountered in uni-axial experiment. Secondly, the different ways to obtain a descent set of files and the post-processing are discussed in order to discern the mechanisms responsible for the loss of mechanical properties. The originality of this paper is the observation of two clear areas when tracing the energy of each hit function of the counts. These two parts are assigned, for the first to fiber rupture and debonding wishes are well known static mechanisms, and to the dynamic behavior such as rubbing, but more important damages too, like local micro-buckling for the second part. This paper finally focuses on determining the role of each of these parts in the decrease of mechanical properties.

Mots Clés : émission acoustique, fatigue, interlock

Keywords : acoustic emission, dynamic testing, interlock

1. Introduction

L'idée reçue selon laquelle les matériaux composites sont insensibles aux effets de fatigue reste vraie dans le cas des matériaux composites unidirectionnels à renfort carbone, de faibles épaisseurs et soumis à des chargements nettement en dessous de leurs limites ultimes [1]. En effet, une initiation de l'endommagement dans la résine n'affecte pas le comportement du composite qui est principalement géré par le comportement des fibres. Ce constat reste partiellement vrai dans le cas de stratifiés UD. L'initiation de l'endommagement et la propagation se font, d'une façon générale selon le schéma suivant : multi-fissuration de la matrice, coalescence des fissures, ruptures interfaciales, délaminage puis rupture des fibres [2]. Ce schéma d'endommagement dépend de la nature de la stratification et du renfort. Naik et al [3] rapportent que dans le cas d'un composite à

renfort tissé, l'initiation de l'endommagement est fortement tributaire de la nature du tissage, du grammage et des zones d'entrelacement. Ces auteurs distinguent deux types d'endommagement :

- les micros-structuraux qui se produisent au sein des mèches et qui se traduisent par la microfissuration de la résine, le micro déchaussement de fibres et les ruptures locales de fibres
- les macroscopiques au sein du tissu et qui sont caractérisés par des ruptures transverses, des ruptures par cisaillement local dans les mèches sens chaîne, des délaminages inter plis et la rupture des plis

Lorsque le renforcement se complexifie, les phénomènes d'endommagement qui en découlent sont encore plus complexes. Les travaux de Tsai [4] décrivent les phénomènes de dégradation pour des interlocks carbone/époxy d'épaisseur 1,5 et 2 mm et pour des fractions volumiques assez faibles (0.25). Il propose cinq étapes différentes dans la dégradation du composite. Premièrement des fissures de surface transverses apparaissent et se propagent dans les torons de trame, dans la deuxième étape, des fissures toujours dans les torons transverses apparaissent à cœur à cause des concentrations de contraintes. Les deux premières étapes se produisent dans le premier dixième de la durée de vie totale. La troisième étape est la décohésion entre les torons de chaîne et de trame ainsi que la rupture de fibres dans la chaîne. Les décohésions s'agrandissent et coalescent au niveau de l'interface entre le toron et la matrice lors de la quatrième phase, tandis que les ruptures de fibres s'accroissent. Les troisième et quatrième étapes sont les phases critiques de l'endommagement. Enfin, la rupture finale, due à l'accumulation d'endommagement, est la cinquième étape.

J.Schneider et al et C. El Hage et al [5-6] ont montré que dans le cas du comportement en statique de composites à renfort interlock (même famille que celui de cette étude), les phénomènes d'endommagement en traction uni-axiale en statique génèrent des endommagements diffus dans toute l'épaisseur du matériau. Outre les phénomènes décrits plus haut, le chainage entre pli génère localement des états de contraintes fortement perturbés par la présence de cisaillement.

L'identification et le suivi de ces mécanismes nécessitent une multi-instrumentation (jauges d'extensométrie, émission acoustique, mesure des champs de déformation par corrélation d'images (DIC), vidéo microscopie, observations MEB post-mortem...). L'association et le traitement de l'ensemble de ces informations a permis de décrire finement les processus de ruine. Cette étude s'inscrit dans la continuité de ces travaux. Elle a pour but d'élaborer des scénarii de ruines dans le cas d'une sollicitation en fatigue sur des composites à renfort interlock. La multi-instrumentation précédemment utilisée est complétée par la mesure de dissipation de chaleur à l'aide d'une caméra infra rouge. Un protocole d'essai est mis au point afin d'identifier les sites d'initiations et ensuite suivre le processus de propagation des endommagements. L'utilisation de l'émission acoustique est privilégiée dans ce sens. Elle permet d'accéder à des informations au cœur du matériau. Divers études ont montré son intérêt et ont permis d'attribuer des mécanismes d'endommagements à des signatures acoustiques [7-9]. Néanmoins, le nombre important de signaux enregistrés impose le choix d'une stratégie pour le suivi des endommagements. Cet article présente la méthodologie mise au point et les principaux résultats obtenus.

2. Présentation du matériau

Les architectures de renforcement tridimensionnels permettent la réalisation de structures composites épaisses plus tolérantes à l'endommagement et plus résistantes en termes de contraintes hors plan et inter-laminaire.

Les matériaux utilisés dans cette étude concernent plus spécifiquement le cas des renforts interlocks carbone couche-couche. La résine utilisée est une époxyde et les matériaux sont mis en œuvre par le procédé de RTM. L'architecture de renforcement tissu présente un Volume Élémentaire Représentatif (VER) atypique liant entre eux les plis adjacents (Fig. 1) afin d'éliminer le

phénomène de délaminage usuellement rencontré dans les stratifications classiques. Cette originalité procure à la structure composite une étonnante capacité de dissipation d'énergie sous impact impliquant la réponse comportementale de l'armure tissée au travers des fibres, de la résine inter et/ou intra-mèches et des interfaces.

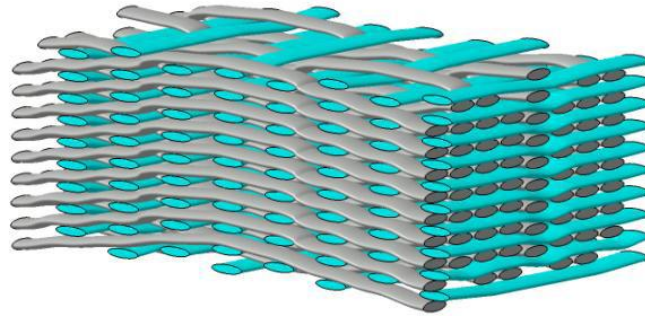


Fig. 1. Tissu multicouche interlock

3. Procédure expérimentale

Les éprouvettes utilisées en forme d'altères sont instrumentés d'un extensomètre disposant d'une plage de mesure de 50mm et positionné sur une tranche de l'éprouvette. L'autre tranche qui est poli servira à l'observation des mécanismes d'endommagement par vidéo-microscopie. Une des deux faces est peinte en noir pour la mesure du champ de température en surface et la seconde présente un mouchetis pour la mesure du champ de déformation par DIC. L'éprouvette est refroidie par un système de vortex tout au long de l'essai. Deux capteurs d'émission acoustique sont utilisés afin de localiser d'une part, les sites des premiers endommagements et d'autre part éliminer les éventuels bruits parasites issus du système d'introduction des efforts.

En début d'essai, l'éprouvette subit un chargement jusqu'à la charge maximale qu'elle verra lors des cycles de fatigues. Lors de cette montée en charge, la mesure des champs de déformation est effectuée accompagnée des observations par vidéo-microscopie. Ce protocole est répété à des intervalles réguliers lors du processus de fatigue permettant ainsi d'avoir des signatures à différents moment de la vie de l'éprouvette (Fig. 2).

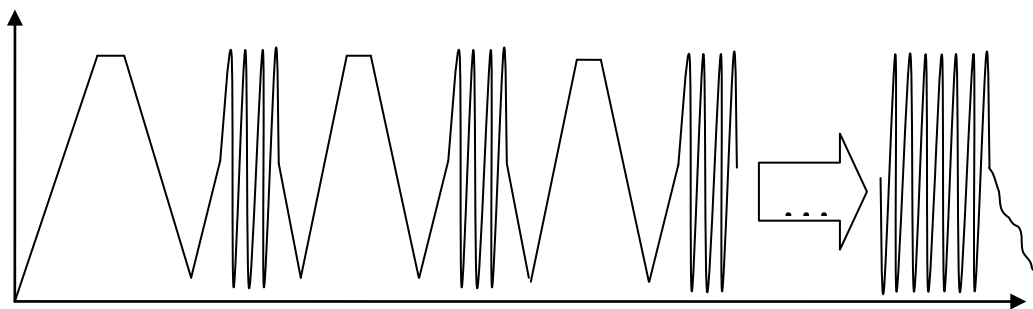


Fig. 2. Protocole de chargement type en traction uni-axiale

Les essais de fatigue sont effectués à des charges maximales proches du seuil d'endommagement statique de l'éprouvette à des rapports R de 0.05, 0.3 et 0.5.

Les essais sont pilotés en charge à une fréquence de 5Hz sur une machine hydraulique Instron 1343 de capacité 250 KN en dynamique.

4. Suivi des endommagements par Emission Acoustique (EA)

Nombreux sont les travaux qui portent sur le suivi des endommagements par EA. Il a été mis en évidence que l'émission acoustique constituait un très bon complément aux autres techniques pour l'identification et le suivi des endommagements. Une revue bibliographique montre que le

traitement des signaux d'EA sont forts nombreux, et on retrouve bien souvent des études contradictoires quant à l'attribution de paramètres signaux acoustiques à des phénomènes physiques [10]. Néanmoins, un consensus semble se dégager concernant le traitement en amplitude des signaux EA où les fortes amplitudes sont en général attribuées aux phénomènes fortement énergétiques comme la rupture de fibres et les faibles amplitudes attribuées à des phénomènes liés à la rupture matricielle [7,11]. D'autres travaux proposent aussi leurs propres différenciations [12-14]. La thèse de J. Schneider sur les interlocks en chargement statique propose une approche propre aux interlocks basée sur le traitement en amplitude corrélé aux cumuls des énergies. Il en résulte la proposition illustrée sur la figure 3. Cette classification servira de point de départ à nos travaux.

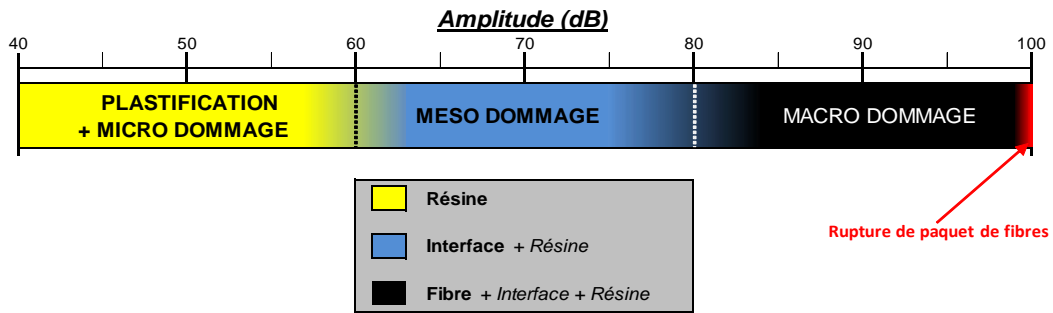


Fig. 3. Classification des signaux pour un Interlock (J. Schneider)

Le système d'émission acoustique utilisé est constitué d'une chaîne d'acquisition Mistras 4 entrées, sur laquelle sont branchés deux préamplificateurs 20Hz-1200kHz suivis des capteurs micro 80 large bande et la paramétrie de force.

Les deux capteurs sont espacés pour filtrer spatialement les bruits issus de la machine et des mors laissant une zone d'écoute suffisamment importante (Fig. 4).

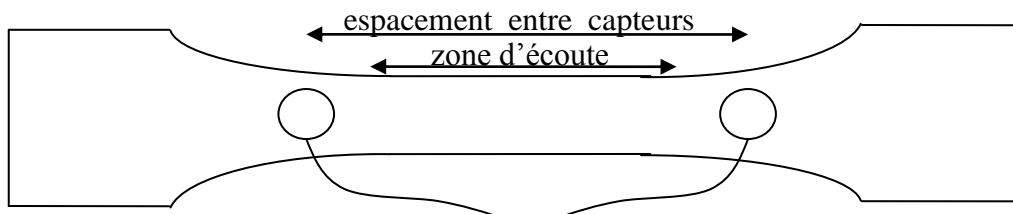


Fig4. Schéma de l'éprouvette instrumentée des capteurs acoustique

Les essais de fatigues sont plutôt longs et une quantité très importante d'information est stockée sur la chaîne d'acquisition. Afin de réduire cette quantité d'information inexploitable, plusieurs solutions ont été envisagées, dont le filtrage spatial, la limitation en amplitude ou encore la non prise en compte des ondelettes.

Le filtrage spatial est une des premières solutions envisagées. Il permet non seulement la réduction du nombre de signaux issus de l'éprouvette, mais il stoppe aussi les signaux qui pourraient être issus des mors ou de la machine. On se concentre ainsi sur la partie utile de l'éprouvette et il est possible de faire une localisation spatiale (1D) des événements acoustiques en connaissant la vitesse de propagation des ondes dans le matériau.

Un autre filtrage consiste à limiter les basses amplitudes, en effet, plus l'amplitude est faible, plus le nombre de signaux est important. La première étape est donc de faire un filtrage seuil à 50dB qui permet de limiter considérablement des données dont la pertinence n'est pas toujours vérifiée. Par ce filtrage, nous assumons l'hypothèse que les signaux de faible amplitude correspondent à des phénomènes qui ne participent que faiblement dans la dégradation du matériau. Malgré ces solutions, les données brutes sont encore très importantes (supérieur à 100Go pour un essai). Une autre solution consiste à supprimer l'enregistrement des ondelettes et ne garder que les paramètres

issus des formes d'ondes (énergie, amplitude, nombre de counts, fréquences, ..). Eventuellement s'il apparaît pertinent d'enregistrer les ondelettes il doit être possible de le faire par intermittence et de n'en étudier que cette partie. Sans les enregistrements de tous les points constituant une ondelette, les quantités de données sont diminuées de manière significative passant d'une centaine de Giga-octets, à seulement quelques Giga-octets. Ce filtrage permet de rendre exploitable des données d'EA issues des essais.

Sans ces quelques filtrages, le traitement d'un essai de fatigue sur son ensemble ne serait pas possible ou prendrait un temps très long. Dans le cadre de cet article, les fichiers sont post-traités avec Noesis, logiciel de traitement statistique par réseau de neurone dédié à l'émission acoustique.

4.1 Traitement et visualisation des signaux

Un logiciel de traitement est indispensable lorsqu'il y a autant de données enregistrées. Il est alors possible d'avoir la visualisation de l'ensemble des événements acoustiques pendant tout l'essai de fatigue. La représentation a toute son importance pour la compréhension des phénomènes et de leurs apparitions. Les visualisations qui, dans le cadre de cette étude, ont un sens sont nombreuses et on retrouve souvent l'amplitude, l'énergie, le nombre de counts, l'effort et le temps dans des représentations de hits, de cumuls ou encore d'histogramme.

Pour les fichiers comportant plusieurs millions de hits, le traitement proposé par le logiciel posait encore quelques soucis, il a donc été décidé de ne s'intéresser qu'aux signaux supérieurs à 70dB par un filtrage logiciel.

En première approche, l'amplitude de chaque hit en fonction du temps montre l'évolution globale de l'essai, notamment la présence de hautes amplitudes dans le début de l'essai. Cette visualisation nous permet de voir directement les types d'endommagements qui ont été définis en statique. Il est ensuite possible d'appliquer des techniques de clusterisation pour créer des classes pertinentes de signaux représentatifs d'un type d'endommagement.

Pour se faire, la clusterisation a été effectuée avec la méthode du K-mean sur une charge simple. Les paramètres pris en compte lors de cette clusterisation sont (nombre de counts, énergie, amplitude, fréquence moyenne, temps de montée, durée). On retrouve alors des classes d'amplitudes qui correspondent à celle qu'on a pu voir précédemment (Fig. 5).

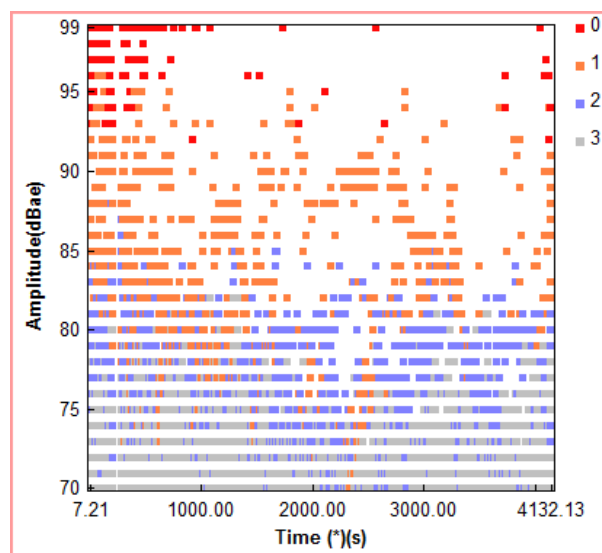


Fig. 5. Evolution de l'amplitude de chaque hit en fonction du temps 4 clusters

Cette méthode de clusterisation peut ensuite être entraînée et réappliquée sur des essais de fatigue. Le logiciel propose notamment la méthode supervisée du K-NNC qui fonctionne sur le principe des réseaux de neurones et permet d'entraîner une classe de proche en proche.

L'application de cette méthode à un essai de fatigue est assez concluante dans une première approche. Elle permet notamment de distinguer les signaux de plus hautes amplitudes qui correspondent à des ruptures de fibres. Cependant, l'affichage de l'énergie en fonction du nombre de counts pour chaque hit nous apporte une visualisation originale de l'essai. Sur le graphique, pour tous les essais sur interlock en fatigue, se distinguent deux branches bien distinctes qui devraient être issues de phénomènes différents. Les classes créées lors de la clusterisation précédente ne rendent pas compte de cette différence entre les signaux et les classes 1, 2 et 3 se retrouvent sur la nouvelle branche (Fig. 6).

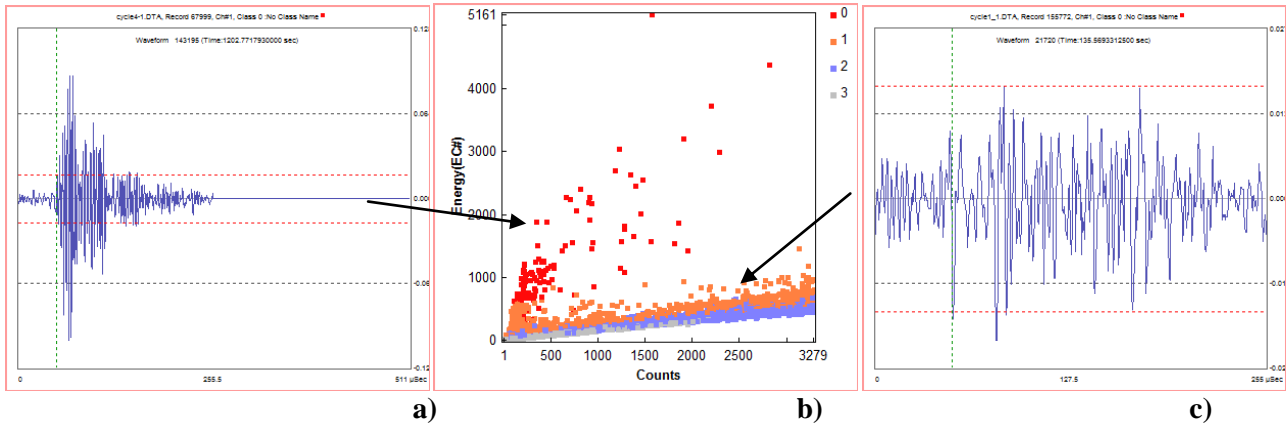


Fig. 6. Evolution de l'énergie de chaque hit en fonction du nombre de counts et clusterisation (b), exemple de signaux issus de la branche 1 (a) issus de la branche 2 (c)

Afin de déterminer à quels types de phénomènes correspondent les signaux des deux branches, plusieurs recouvrements ont été faits. Premièrement, les essais de statique sur le même matériau ne donnent de hits que sur la branche 1 (la plus verticale), la branche 2 représente donc à priori des phénomènes différents de ceux constatés en statique. La conduite d'essai avec un rapport de charge plus élevé ont permis d'apporter encore d'autres éléments. En effet, avec un rapport de charge de 0.5, l'interlock reste en tension tout au long de l'essai. De cette façon on supprime une grande partie des frottements ainsi que des micro-flambements qui pourraient apparaître lors du relâchement du composite. Ces micro-flambements sont des fibres isolées, déchaussées qui ne peuvent pas retourner à leurs états initiaux et finissent pas flamber en compression. Ce phénomène n'a pas été observé directement, cependant en traçant l'effort auquel est survenu chaque hit en fonction du temps, il apparaît une grande quantité de signaux de haute énergie pour les états de contrainte faible.

La compréhension de l'effet des différentes branches sur l'état de santé de l'éprouvette passe par une classification pour les isoler. Pour se faire, il a été tenté de faire une approche par méthode de K-mean comme dans le cas de l'essai statique. Il apparaît qu'il est très dur d'obtenir deux branches bien distinctes, quelques soient les paramètres choisis. Le choix a été fait de construire une clusterisation manuellement en ajoutant les hits de la branche 2 à une nouvelle classe. De la même façon que ce qui avait été fait en statique, cette méthode est entraînée pour en faire une méthode supervisée qui est appliquée aux autres essais. Dans ce cas, la clusterisation est construite sur un essai assez nourri dans les deux branches, il est aussi possible de rajouter à cet essai les données d'un essai de traction simple qui apporte une plus grande importance à la branche 1. L'application de cette méthode aux autres essais n'est pas toujours efficace et montre encore la difficulté du logiciel à différencier les deux branches. Les parties mal identifiées de chaque branche (<1%) sont replacées manuellement dans la classe correspondante. Il est alors possible d'établir le lien entre chaque branche et son influence sur l'état d'endommagement.

4.2 Influence sur l'état d'endommagement

L'explication de l'importance de chaque branche passe par l'illustration sur un exemple, ici un essai de fatigue avec un niveau de chargement supérieur à la limite d'endommagement. Il sera vu ensuite les liens qui peuvent être établis avec les autres essais.

Dans le cas présent, la première charge illustre parfaitement les essais de traction simple et on retrouve un comportement avec une partie linéaire et une zone d'endommagement. Les signaux acoustiques, comme prévu, ne forment qu'une seule branche qui peut se superposer à la branche 1. Tous les endommagements classiquement définis en statique sont présents et une perte de rigidité assez importante est enregistrée après l'atteinte de la zone d'endommagement.

Dans le début de la partie dynamique, on enregistre la poursuite de la perte de rigidité en adéquation avec les signaux de la branche 1. Ce sont donc bien les signaux de la branche 1 qui vont être révélateur de la baisse du module de Young (Fig. 7).

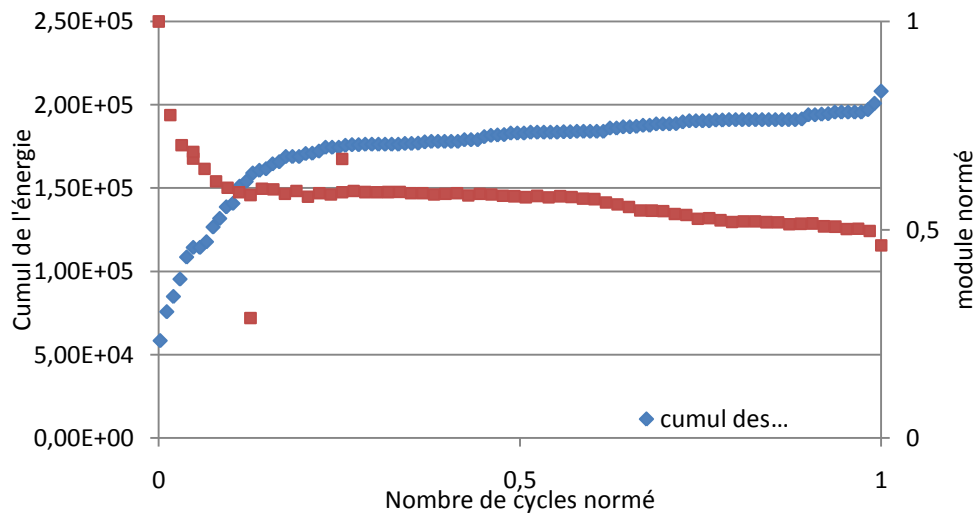


Fig7. Perte de rigidité et cumul de l'énergie des signaux de hautes amplitudes

Pour la suite de l'essai, des événements des deux branches vont apparaître tout au long de l'essai mais ne s'accompagneront pas d'une baisse de rigidité celle-ci ayant atteint un pallier propre au tissage lorsque la structure est « déliée » et n'est maintenue plus que par les torons, les fissures matricielles ayant coalescées et les fibres isolées qui pouvaient assurer une cohésion ont cassé. L'analyse des boucles de chargement au cours de l'essai montre bien ce phénomène avec l'atteinte d'une forme en banane dès les premiers signes de perte de rigidité. Ainsi, pour le début du cycle, les torons sont plutôt libres puis vont être de plus en plus sollicités jusqu'à l'état maximal (Fig. 8).

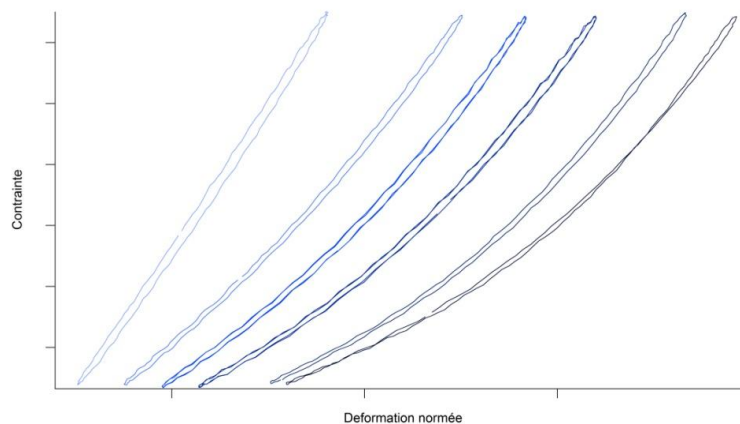


Fig8. Evolution des cycles à différents instant de la durée de vie. Du plus clair au plus foncé pour 0, 3, 7, 12, 60 et 95 % de la durée de vie.

La décharge suit le même chemin en sens inverse. L'évolution de l'énergie en fonction du niveau de chargement auxquels ont été enregistrés les événements acoustiques fournit des informations supplémentaires. Sur cette dernière figure (Fig. 9), il se forme un « V » qu'on retrouve également sur plusieurs essais. Il n'est pas possible pour le moment de définir s'il s'agit d'événement qui apparaissent lors de la charge ou de la décharge de l'éprouvette, cependant les phénomènes issus de ce « V » et ayant une énergie plutôt importante sont à l'origine d'endommagements du matériau qui mènent à la ruine finale.

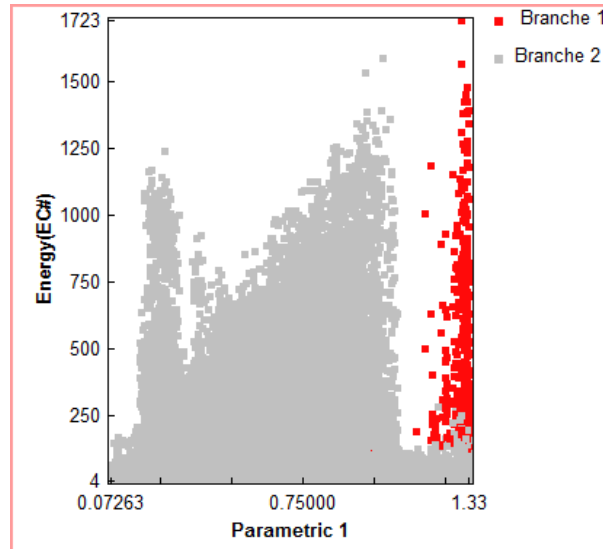


Fig. 9. Energie de chaque hit et son niveau de charge (paramétrique 1)

La corrélation de ces résultats avec les essais à rapport de charge différent (mais même charge maximale) confirme le fait que la ruine se produit pour des niveaux de chargement différents de celui maximum et même plutôt bas. En effet, pour ces trois éprouvettes, la branche 1 est présente, cependant, on constate que la branche 2 qui n'apparaît pas sur l'essai à $R=0.5$ est de plus en plus présente tandis que le rapport de charge diminue démontrant bien le lien de causalité entre la présence de la branche 2 et la perte de rigidité (Fig. 10).

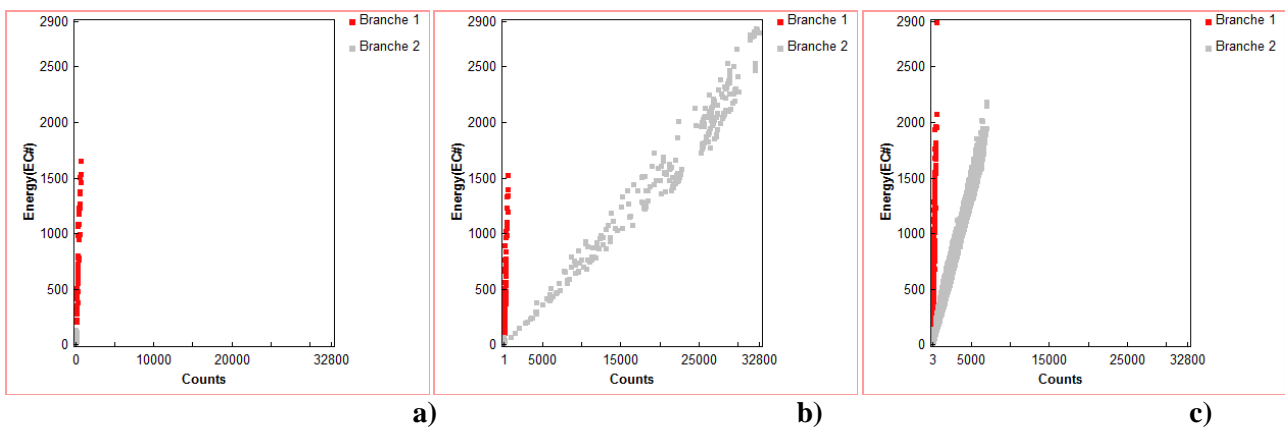


Fig. 10. Evolution de l'énergie de chaque hit en fonction du nombre de counts et clusterisation pour
a) $R = 0.5$, b) $R = 0.3$, c) $R = 0.05$

La branche 2 est en fait liée à la branche 1, il faut un certain avancement des dommages de la branche 1 pour voir apparaître la branche 2. Ainsi la branche 2 est une conséquence de la branche 1, mais qui participe également fortement aux pertes de rigidité en endommageant les fibres à des niveaux de chargement bas, notamment par des micro-flambements dus à des compressions locales.

Il est tout de même important de noter que les signaux de haute énergies (branche 1 ou 2) ne représentent qu'une petite fraction de l'ensemble des signaux enregistrés sur un essai (<5%). Les signaux de basse énergie et faible nombre de counts sont assimilés à un ensemble de phénomènes dont frottements, ruptures matricielles, décohésions font partie. A priori ces phénomènes ne sont pas responsables de la perte de rigidité et sont présents pour n'importe quel niveau de charge, mais sont peut être noyés au milieu des signaux de plus haute importance puisqu'on retrouve tout de même des amplitudes supérieur à 80dB. L'état actuel des travaux ne permet pas de le déterminer avec certitude.

5. Conclusion

Ce papier a montré qu'il est possible de suivre l'endommagement lors d'un essai de fatigue d'un composite interlock et ainsi déterminer quels sont les phénomènes à l'origine de la perte de propriété du matériau. La représentation de l'énergie de chaque hit en fonction de son nombre de counts permet de distinguer deux branches qui ont des impacts différents sur l'essai. La première branche représente les mêmes phénomènes que ceux présents sur les essais statiques (à savoir ruptures de fibres, matricielles, et déchaussement) tandis que la deuxième est propre aux essais de fatigue avec une grande partie de frottement, mais aussi des phénomènes de hautes énergies qui apparaissent lors du relâchement du matériau avec des micro-flambements.

Il a été montré que l'étude du cumul en énergie des signaux issus de la branche 1 se corrélait très bien avec la perte de rigidité enregistrée au cours de l'essai et que les signaux de hautes énergies de la branche 2 nécessitaient quelques signaux de la branche 1 pour apparaître à leurs tours

L'émission acoustique est donc un outil pertinent dans le suivi des endommagements en fatigue sous réserve de limité d'une façon ou d'une autre la quantité de donnée très importante qu'il peut y avoir.

6. Perspectives

Il sera intéressant de prendre en compte les signaux de faible énergie et nombre de counts qui ont été mis de côté pour cette étude en effet, ils recèlent sûrement des informations supplémentaires dans la compréhension des mécanismes d'endommagement.

La mise en place de classes plus précises, notamment la distinction entre endommagement de matrice et de fibre, mais aussi frottement et micro-flambement. Il sera alors possible de déterminer avec plus de précision le déroulement des différentes étapes en fatigue.

Enfin, la diminution de la vitesse des ondes dans le matériau et l'atténuation des signaux au cours de la durée de vie n'a pas été évoquée dans l'article mais a une influence non négligeable sur les résultats. Il faut si possible prendre en compte ces paramètres ce qui n'est pas aisé au vue de l'hétérogénéité du matériau.

Références

- [1] B. Harris, « A historical review of the fatigue behavior of fibre-reinforced plastics ». *Fatigue in composites*, Chapter 1, pp. 3-31, 2003.
- [2] SP. Pantelakis G. Labeas., « Constant and variable amplitude fatigue damage of laminated fibrous composites ». *Failure Analysis of Industrial Composite Material*, eds, E. E. Gdoutos, K. Pilakoutas, C. A. Rodopoulkos, New York, pp. 247-298, 2000.
- [3] N. K. Naik, *Woven Fabric Composites*, Technomic Publishing Co., Inc., Lancaster, Pennsylvania, 1994.
- [4] K.-H. Tsai, C.-H. Chiu, T.-H. Wu, « Fatigue behavior of 3D multi-layer angle interlock woven composite plates ». *Composites Science and Technology*, Vol. 60, pp. 241-248, 2000.
- [5] J. Schneider, et al., « Contribution of damage mechanisms comprehension of interlock-reinforced composite material ». *13th European Conference on Composite Materials (ECCM13) Proceedings*, 2008.
- [6] C. El Hage , « Modélisation du comportement élastique endommageable de matériaux composites à renfort tridimensionnel ». *Roberval PhD Thesis, Université Technologique de Compiègne: Compiègne*, 2006.
- [7] S. Barré, M.L. Benzeggagh, « On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre-reinforced polypropylene ». *Composites Science and Technology*, Vol. 52(3), pp. 369-376, 2002.

- [8] J. Schneider, « Mécanismes d'endommagement dans les composites tissés interlock ». *PhD Thesis, Université Technologique de Compiègne: Compiègne*, 2011.
- [9] S. Huguet, N. Godin, R. Gaertner, L. Salmon, D. Villard, « Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester ». *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 1433-1444, 2002.
- [10] R. Gutkin, C.J. Green, S. Vangrattanachai, S.T. Pinho , P. Robinson , P.T. Curtis, « On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses». *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 25, pp. 1393-1407, 2011.
- [11] J. M. Berthelot, « Relation between amplitudes and rupture mechanisms in composite materials». *Mechanical Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 7, pp. 284-299, 1988.
- [12] T. M. Ely, E. Hill, « Longitudinal splitting and fiber breakage characterization in graphite epoxy using acoustic emission data». *Materials Evaluation*, pp. 288-294, 1995.
- [13] A. C. Barnes, G. Ramirez, « Acoustic emission testing of carbon fiber composite offshore drilling risers». *6th International Symposium on Acoustic Emission from Composite Materials AECM-6, American Society for Nondestructive Testing, Inc., San Antonio, Texas, June 1-4*, pp. 13.22, 1998.
- [14] C. Bonnafous, et al, « Analyse multi-échelle des mécanismes d'endommagement de composites chanvre/époxy par émission acoustique». *Proceedings JNC16*, 2009.