

## CFA/VISHNO 2016

**Effet de la température sur le contrôle de santé par capteurs intégrés des matériaux composites**M. Abakar<sup>a</sup> et A. El Mahi<sup>b</sup><sup>a</sup>UNIVERSITE DU MAINE, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, IUT  
GMP le Mans, 72 085 Le Mans, France<sup>b</sup>Université de Maine, Laboratoire d'Acoustique de l'UM UMR CNRS 6613-Av. O.  
Messiaen, 72085 Le Mans, France  
malloum.abakar.etu@univ-lemans.fr

LE MANS

Le travail présenté vise à étudier l'effet de la température sur le comportement et l'endommagement des composites verre/époxy instrumentés par implant piézoélectrique. L'endommagement a été détecté à travers le traitement des données d'EA acquises au cours des essais de traction. Les signaux acoustiques collectés ont été analysés par la méthode de classification multiparamètres disponible sur NOESIS (k-moyennes), permettant ainsi d'identifier les salves acoustiques émises par chaque type d'endommagement et de suivre leur évolution dans les matériaux instrumentés dans la masse au cours des essais. L'insertion des capteurs dans la masse n'influe pas sur la résistance mécanique du matériau mais favorise la décohésion et le délaminage au début des essais. La température a joué un rôle important tant au niveau du comportement mécanique des matériaux qu'au niveau de leurs émissions d'événements acoustiques. Les matériaux testés à 60°C et 100°C se sont rompus avant ceux testés à la température ambiante et ont fourni peu d'événements acoustiques.

## 1 Introduction

Les composites sont des matériaux constitués, au moins, des deux matériaux de natures différentes. L'ensemble formé permet d'obtenir un matériau ayant des meilleures caractéristiques que celui des composantes prises séparément [1,2]. En général, ils sont constitués d'une ossature appelée matrice et des renforts ou fibres. De nos jours, les industries aéronautique, maritime, automobile et ferroviaire utilisent, généralement, les matériaux composites à fibres continues et à matrices polymères dans des applications structurales. Dans la plupart de temps ces structures évoluent dans un environnement hostile pouvant provoquer la dégradation ou la détérioration de leurs constituants (fibres et matrices). Pour des composites à base polymère soumis à une sollicitation mécanique, l'expérience a montré que l'on peut distinguer quatre modes d'endommagement [3,4]: la fissuration matricielle, la rupture de l'interface fibre/matrice ou décohésion, la rupture des fibres et le délaminage inter plis. Dans la perspective de quantifier l'endommagement de ces matériaux et d'identifier les différents mécanismes sources, les méthodes de contrôle non destructif (CND) des matériaux composites, depuis leur polymérisation jusqu'à la fin de leur cycle de vie, sont nécessaires.

Notre étude s'est orientée vers le contrôle de santé structurale en temps réel et en continu par capteurs piézoélectriques insérés dans la masse. Notre choix s'est porté sur des capteurs piézoélectriques grâce à leurs caractéristiques adaptables dans le cadre de notre travail sur les matériaux composites dit «intelligents».

Ces capteurs sont utilisés de manière passive comme capteur d'EA provenant des mécanismes d'endommagement au cours des essais. Cependant, l'incorporation de ces éléments dans la masse peut fragiliser le matériau et peut être source d'endommagement et de rupture. Ce point est également étudié en fonction de la température et en fonction des différents types de chargement mécanique appliqués sur des échantillons de matériaux composites. Yu Bai et al.[5] ont analysé le comportement sous l'essai de traction d'un composite verre/UP sous l'effet de la température (20-220°C). Leurs résultats montrent que la contrainte à la rupture diminue progressivement (dégradation de 18% entre 20°C à 100°C) pour les températures inférieures à 100°C et chute de 80% à 220°C. Y. Perrot [6] a montré que les caractéristiques à la rupture ainsi que l'allure de la courbe de comportement des stratifiés verre/polyester dépendent fortement de la température.

Notre travail consiste à fabriquer des composites avec implant piézoélectrique intégré dans la masse et de les solliciter en traction en faisant varier la température. L'étude est menée dans le but de voir l'influence de la température sur le comportement mécanique et les

mécanismes d'endommagement des matériaux composites instrumentés par des capteurs piézoélectriques.

## 2 Matériaux et mise en œuvre

Les matériaux utilisés dans ce travail sont des stratifiés constitués d'une matrice en résine époxyde et des fibres de verre à plis croisés avec une séquence d'empilement du type  $[0_4/90_4]_s$ . La mise en œuvre est réalisée au sein du Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (LAUM) à partir de nappe fournie sous forme de rouleaux. Le dosage utilisé est de 50% de fibres, 37.5% de résine époxyde et 12.5% de durcisseur. La matrice utilisée est un mélange d'une résine époxyde SR1500 avec le durcisseur SD2505 fournie par la société SICOMIN. La technique utilisée pour la mise en œuvre est celle dite de « sac » (moulage sous vide). Les différentes couches sont stratifiées et imprégnées à température ambiante, puis moulées sous vide entre le moule et le contre moule après interposition de divers tissus de moulage. L'ensemble est mis dans une poche dans laquelle on fait un vide (dépression de 30 kPa) pendant 8 heures à température ambiante. L'interposition d'un moule et d'un contre moule permet de contrôler l'épaisseur des plaques réalisées. Pour les stratifiés avec capteur intégré dans la masse, une pastille piézoélectrique sous forme de disque est intégrée au sein de chaque éprouvette comme le montre la figure 1.

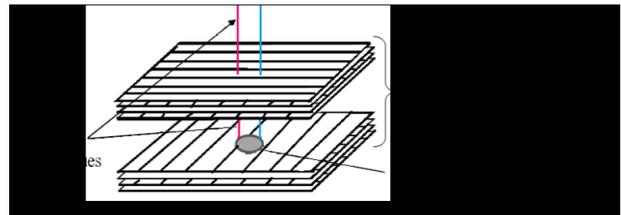


Fig. 1. Matériau stratifié croisé intégré par capteur piézoélectrique

## 3 Protocole et dispositifs expérimentaux

### 3.1. Essai de traction

Les matériaux composites étudiés sont soumis aux essais de traction statique à température ambiante (30°C), à 60°C et 100°C. Les essais ont été effectués sur une machine de marque INSTRON 8801 dotée d'une cellule de force de capacité 100 kN avec une vitesse de déplacement de 1mm/mn. Le maintien en position des éprouvettes est assuré par des mors à serrage manuel. Le dispositif est équipé d'une enceinte climatique permettant la réalisation des essais à différentes températures (Fig.2).

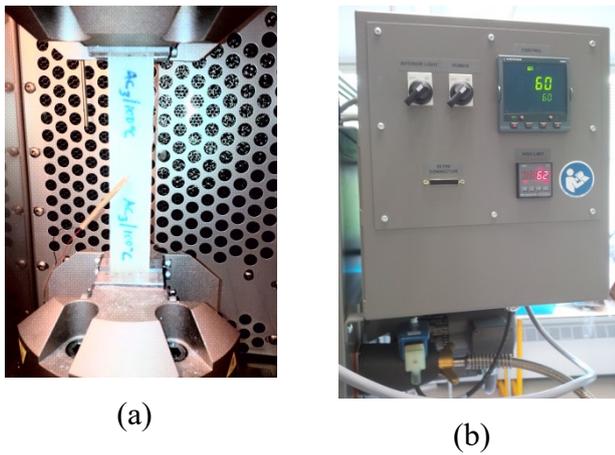


Figure 2. Dispositif expérimental et mise en température

### 3.2 Acquisition des données d'EA

L'acquisition de l'émission acoustique (EA) est effectuée à l'aide du logiciel AE Win (Euro Physical Acoustics). Ce système est calibré avant chaque essai en utilisant une procédure de casser de mine [7] qui permet de générer des sources étalons d'ondes élastiques simulant l'EA. Les signaux d'EA sont détectés par les capteurs piézoélectriques. Ensuite ils sont amplifiés à l'aide des préamplificateurs de 40dB de gain situés entre les capteurs et la carte d'acquisition numérique et échantillonnés avec une fréquence d'échantillonnage généralement de 5MHz (Fig 3.). Les signaux sont enregistrés par le système d'acquisition pour poste traitement. Ces enregistrements permettent de suivre l'évolution de l'endommagement en adoptant une classification par la technique des k-moyennes. Cinq paramètres des plus pertinents ont été utilisés : amplitude, énergie, temps de montée, durée et nombre de coups; sous le logiciel Noésis [8]. Au cours de l'acquisition, un seuil d'acquisition, qui est l'amplitude minimale pour laquelle un signal sera enregistré, est fixé en fonction des capteurs et du bruit environnant, de manière à ce qu'aucune salve ne soit enregistrée lorsque l'échantillon n'est pas sollicité dans les conditions normales des essais (placement des capteurs, couplage, bruit de fond généré par la machine).

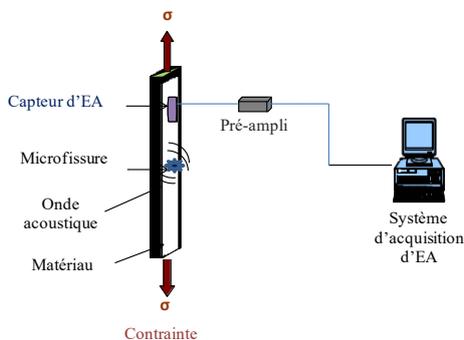
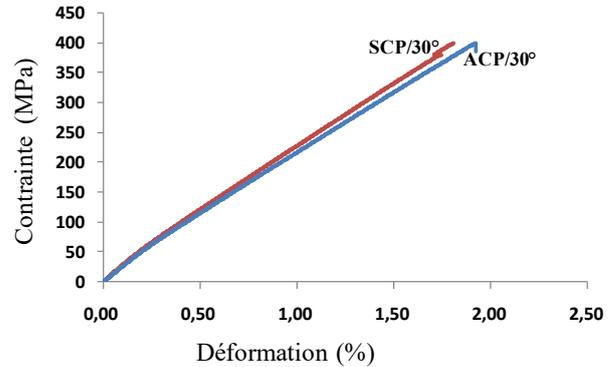


Figure 3. Dispositif expérimental de l'émission acoustique

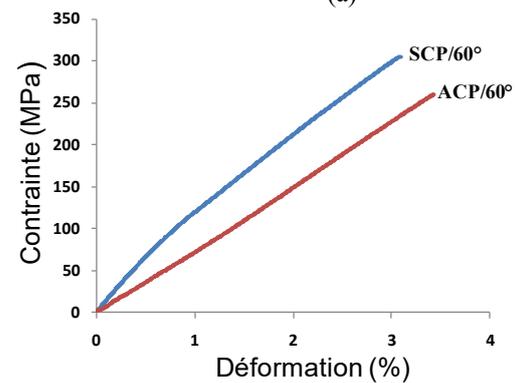
## 3.3 Résultats et discussion

### 3.3.1 Comportement mécanique

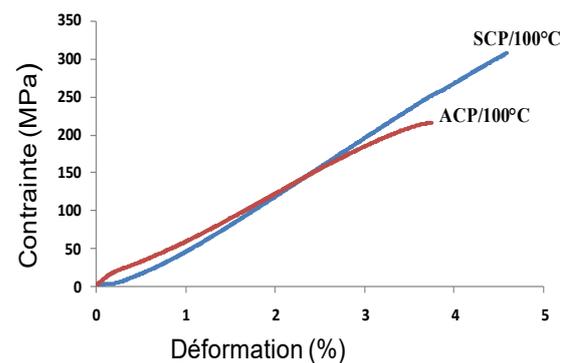
Les éprouvettes sont sollicitées en traction jusqu'à la rupture. Dans la figure 4 sont comparés les résultats (contrainte/déformation) obtenus dans des composites sans capteur (SCP) et ceux obtenus dans des composites avec capteurs piézoélectriques intégrés (ACP), sollicités sous une température de 30°C (Fig. 4a), 60°C (Fig. 4b) et 100°C (Fig. 4c).



(a)



(b)



(c)

Figure 4. Courbes contrainte/déformation en traction des composites avec et sans capteur intégré sous différentes températures : a) 30°C, b) 60°C et c) 100°C

Il ressort de cette figure que le comportement mécanique de l'ensemble des échantillons testés à 30°C et 60°C (Fig.4.a et Fig.4b) présente deux zones. Une première zone, assez courte, caractérisant la partie élastique du matériau permettant de déterminer les caractéristiques

élastiques. Une deuxième zone aussi linéaire jusqu'à la rupture qui est de type fragile. Le changement de la linéarité entre les deux zones met en évidence un début d'endommagement par le développement de microfissures au sein du matériau. Nous constatons une rupture précoce dans le cas des éprouvettes incorporées de pastilles.

Par contre pour les matériaux testés à 100°C (Fig.4c) nous constatons que les matériaux avec et sans capteurs piézoélectriques, présentent un comportement irréversible. Cette particularité est associée à l'état caoutchouteux de la matrice provoqué par la température d'essai, qui est de 100°C, supérieure à la température de la transition vitreuse de la résine époxy. Les caractéristiques mécaniques sont affectées par cette température.

La figure 5 met en évidence l'effet de la température sur le comportement mécanique des composites stratifiés. Elle présente l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation, lors de l'essai de traction, pour des éprouvettes avec capteur piézoélectrique à des températures de 30°C, 60°C et 100°C. Nous remarquons une dégradation des caractéristiques mécaniques avec l'augmentation de la température.

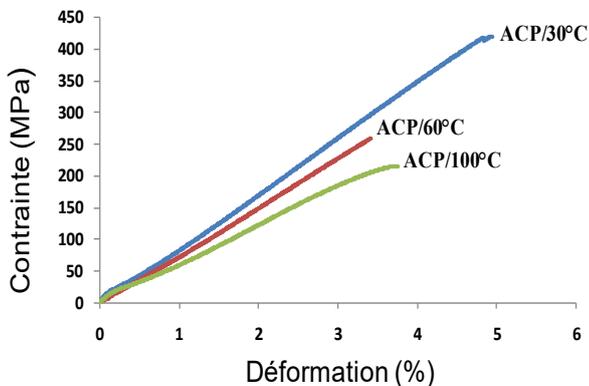


Figure 5. Courbes contrainte/déformation des essais de traction des composites avec capteur intégré à différentes températures

Le tableau 1 présente les caractéristiques mécaniques déduites des essais de traction des éprouvettes avec et sans capteurs intégrés pour différentes températures. Nous constatons que la température contribue à la diminution des caractéristiques mécaniques (contraintes et déformations à la rupture ainsi que le module de Young longitudinal) de l'ensemble des échantillons.

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques déduites des essais de traction des composites à différentes températures

| Température                   | 30°C      |           | 60°C      |          | 100°C   |         |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|---------|---------|
|                               | SCP       | ACP       | SCP       | ACP      | SCP     | ACP     |
| Déformation à la rupture (%)  | 1,98±0,17 | 1,80±0,68 | 2,84±0,17 | 3,67±0,1 | 3,7±0,8 | 3,6±0,2 |
| Contrainte à la rupture (MPa) | 414±15    | 376±35    | 282±12    | 251±8    | 252±34  | 205±23  |
| Module d'Young (GPa)          | 20,68±0,5 | 20,05±1,5 | 9,34±0,25 | 7,48±0,6 | 5,4±0,7 | 4,7±0,1 |

### 3.3.2 Analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement

Le traitement des signaux acoustiques est réalisé à l'aide du logiciel Noesis en utilisant la méthode non supervisée des *k*-moyennes. Le nombre de classes est

optimisé en prenant la valeur minimale du critère de Davies et Bouldin  $R_{DB}$  [9] par balayage de 2 à 5 classes. La figure 6 donne les facteurs  $R_{DB}$  obtenus pour les matériaux avec capteur intégré à différentes températures (30, 60 et 100°C). La classification effectuée nous permet d'obtenir quatre classes dans les composites sollicités à des températures de 30°C et 60°C et deux classes dans les composites sollicités à une température de 100°C.

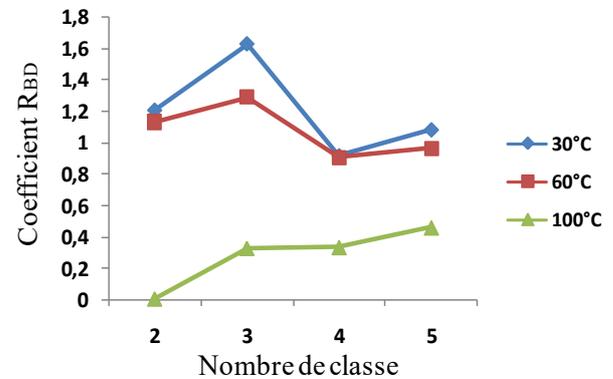


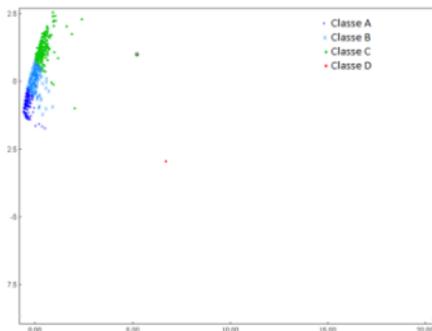
Figure 6. Critère de Davies et de Bouldin en fonction du nombre de classes dans le cas des composites avec capteur intégré à différentes températures

L'analyse des signaux acoustiques collectés ainsi effectuée a permis d'identifier les salves acoustiques émises par chaque type d'endommagement et de suivre leur évolution au cours des essais. Les figures 7 à 9 donnent une comparaison des résultats de la classification de l'activité acoustique obtenue, par la technique des *k*-moyennes, pour les matériaux composites stratifiés avec capteur piézoélectrique inséré dans la masse pour diverses températures, en termes d'Analyse en Composantes Principales (ACP) (Fig.7), distribution d'amplitude en fonction du temps (Fig. 8) et chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement (Fig. 9). Ces figures illustrent une comparaison de la classification des signaux d'EA pour les composites croisés avec capteur piézoélectrique intégré, sollicités en traction statique et pour les températures de 30°C, 60°C et 100°C. Pour les trois essais effectués, la classification des signaux d'EA met en évidence la présence de quatre classes pour les essais effectués sous 30°C et 60°C et deux classes pour l'essai réalisé sous une température de 100°C (Fig. 7.).

La représentation de l'ACP (Fig. 7), dans le cas des matériaux sollicités à des températures de 30°C et 60°C, montre que la plupart des signaux sont concentrés sauf ceux provenant de la dernière classe (Classe D). Cette représentation montre la présence des quatre classes qui sont bien identifiées. La première classe obtenue contient des signaux dont l'amplitude est comprise entre 60 et 68 dB. Ces signaux proviennent des microfissurations matricielles (signaux de type A). La deuxième classe contient des signaux d'amplitude comprise entre 64 et 74 dB. Ces signaux correspondent aux décohésions des interfaces fibres/résine (signaux de type B). La troisième classe (type C) contient des signaux très énergétiques avec des amplitudes qui atteignent 95 dB. Ces signaux se réfèrent à la rupture des fibres. La quatrième et dernière classe est le délaminage entre les couches 0° et 90° représenté par la classe D. Cette quatrième classe obtenue contient des

signaux un peu plus énergétiques avec des amplitudes comprises entre 78 et 90dB.

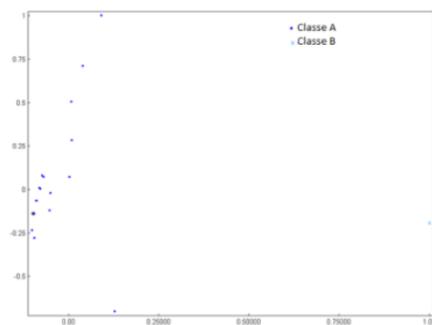
Dans le cas des éprouvettes sollicitées sous la température de 100°C, la première classe contient des signaux avec des amplitudes allant de 60 à 75dB. Ce sont des signaux issus de la décohésion fibre/matrice (signaux de type A). Cette décohésion se développe dans les plis adjacents ou à l'interface de ces plis et provoque, par la suite, la rupture de l'éprouvette par délaminage (signaux de type B) dont l'amplitude des signaux dépasse les 80dB. La particularité pressentie sur la diminution des mécanismes d'endommagement au niveau des éprouvettes sollicitées sous une température de 100°C (deux classes) s'explique par le fait que, sous l'effet de la température, la résine, dont le rôle est de transmettre les charges entre les fibres afin d'utiliser leurs propriétés mécaniques et de les maintenir dans un état compact, devient molle et se désolidarise d'avantage des fibres. A 100°C, température supérieure à la température de la transition vitreuse de la résine époxy, la matrice ne se fissure jamais et par conséquent, il ne peut pas y avoir d'endommagement lié à la fissuration matricielle et de même la rupture des fibres.



(a)

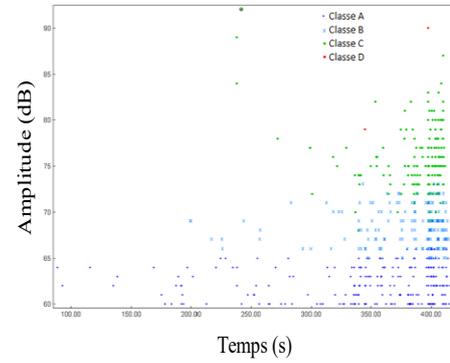


(b)

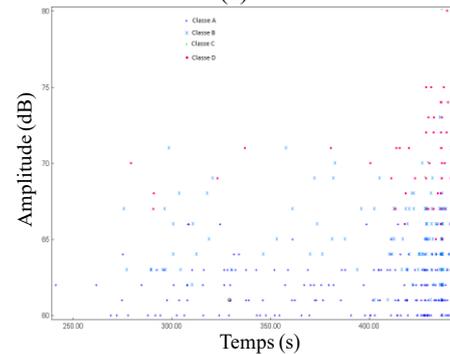


(c)

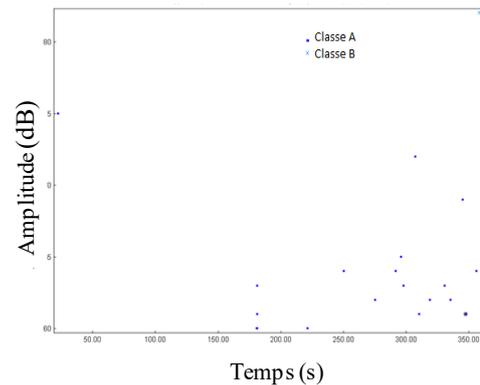
Figure 7. Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode des k-moyennes des éprouvettes testées à différentes températures : a) 30°C, b) 60°C et c) 100°C



(a)



(b)



(c)

Figure 8. Distribution de l'amplitude des signaux en fonction du temps des éprouvettes testées à différentes températures a) 30°C, b) 60°C et c) 100°C

La figure 9 illustre la chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement des composites stratifiés avec capteur intégré testés sous des températures de 30°C, 60°C et 100°C. Nous constatons sur ces figures que les trois premiers mécanismes d'endommagement (fissuration matricielle, décohésion fibre/matrice et rupture des fibres), dans le cas de l'éprouvette sollicitée sous une température de 30°C et 60°C (Fig. 9.a et 9.b), apparaissent successivement et se propagent presque simultanément jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Notons que la fissuration matricielle commence un peu plus tôt que les autres mécanismes d'endommagement et implique beaucoup plus de salves. Cependant, le comportement du composite sollicité sous 60°C montre que le mécanisme d'endommagement associé à la classe D (délaminage) est important par rapport à celui du matériau testé sous température ambiante (30°C). Le matériau sollicité sous une température de 100°C présente peu de mécanismes d'endommagement et bien évidemment, pas assez

d'événements (Fig.9.c). La décohésion matricielle est le mécanisme dominant par rapport au délaminage et il n'y a pas eu de rupture de fibres.

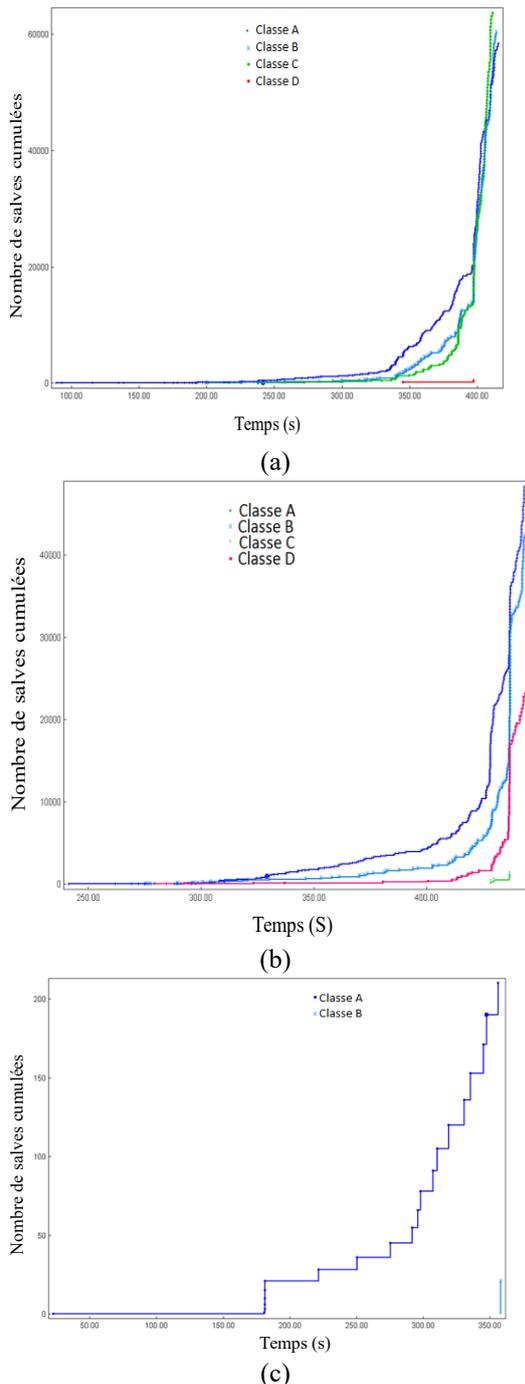


Figure 9. Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement des éprouvettes testées à différentes températures a)30°C b) 60°C et c) 100°C

La figure 10 donne la comparaison du nombre de salves cumulées dans les éprouvettes en fonction du temps et pour les différentes températures. Nous remarquons que la température agit fortement sur le comportement des éprouvettes testées en termes de l'émission d'événements acoustiques. Toutefois, l'éprouvette testée à la température ambiante (30°C) émet beaucoup de salves (1394 événements) contrairement aux deux autres (60°C et 100°C). Le nombre de salves est de l'ordre de 470 événements pour l'échantillon testé sous la température de 60°C et de 20 événements pour celui testé sous la température de 100°C. Cette différence, qui semble être

logique, se réfère aux raisons qui viennent d'être évoquées en haut. Ainsi nous pouvons dire que la température influence amplement sur le comportement de la matrice et de ce fait sur les caractéristiques du matériau tout entier.

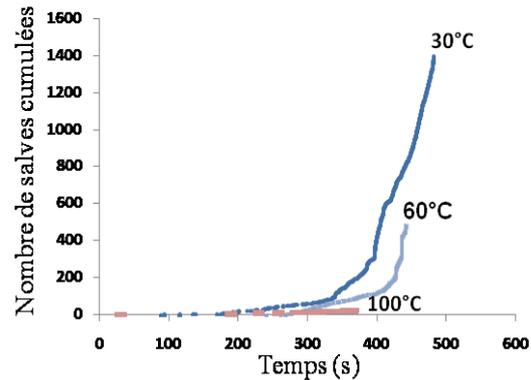


Figure 10. Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement des éprouvettes testées en fonction de la température

## 4 Conclusion

Dans ce travail, on a été amené à insérer au sein de nos échantillons composites des pastilles piézoélectriques de faible taille. L'étape tout à fait délicate de leur mise en œuvre, fait engendrer des discontinuités et des défauts dans la matrice. Lorsque ce matériau est soumis à des sollicitations extérieures, ces discontinuités contribuent à l'initiation de l'endommagement et à une perte de rigidité de l'élément structural et par la suite une rupture précoce.

L'analyse et l'observation des signaux d'EA en fonction du type d'échantillon, au cours des essais, ont permis de définir les principales signatures acoustiques des modes d'endommagement prépondérants dans des matériaux composites: fissuration matricielle, décohésions fibre/matrice, délaminage et rupture des fibres. Ces signatures acoustiques semblent être plus ou moins influencées par la température. Cette étude nous amène à formuler les conclusions suivantes :

L'intégration d'un nouvel élément au sein du matériau composite favorise la détection de l'initiation, la propagation et l'accumulation des défauts microscopiques précoces dont leurs emplacements chronologiques n'étaient pas validés par la littérature, néanmoins ces avantages sont limités par une faible dégradation des propriétés mécaniques du matériau. Les éprouvettes avec capteur intégré atteignent leur rupture avant celles sans capteur intégré puisqu'elles sont sujettes des phénomènes de concentration des contraintes.

Les propriétés mécaniques des éprouvettes testées à des températures (60°C et 100°C) se sont dégradées, surtout celles des éprouvettes testées à 100°C. Elles présentent un comportement irréversible (non linéaire) du début jusqu'à leur rupture qui est presque ductile.

Le suivi par émission acoustique nous a permis d'identifier et de suivre l'évolution des mécanismes d'endommagement dans les composites au cours des essais de traction effectués à la température ambiante (30°), à 60°C et à 100°C et de les attribuer aux classes correspondantes : fissuration matricielle, décohésion, délaminage et rupture de fibres pour les éprouvettes testées à 30°C et 60°C et décohésion et délaminage pour celles testées à 100°C. De même le nombre de salves varie en

fonction de la température. Plus la température augmente moins est le nombre de salves.

## Références

- [1] E. B. Ndiaye, Contrôle santé de structures sandwichs composites, caractérisation et évaluation non destructives de l'adhésion et du vieillissement -Simulations par éléments finis et expérimentation par mesure d'impédance et par ultrasons multiéléments, Thèse de doctorat, Université du Havre, 2014
- [2] W. Albouy, De la contribution de la visco-élasto-plasticité au comportement en fatigue de composites à matrice thermoplastique et thermodurcissable, Thèse de doctorat, INSA du Rouen, 2013
- [3] S. Masmoudi, A. El Mahi, S. Turki & R. El Guerjouma "Mechanical behaviour and health monitoring by Acoustic Emission of unidirectional and cross-ply laminates integrated by piezoelectric implant" *Applied Acoustics, Volume 86, Pages 118-125 December 2014.*
- [4] B. Yu, V. Till, K. Thomas, Modeling of thermo-physical properties for FRP composites under elevated and high temperature, *Composites Science and Technology*, 2007, 3098–3109
- [5] Y. Perrot, Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites verre/polyester utilisés en construction navale de plaisance Cas des résines polyester limitant les émissions de styrène. Thèse de doctorat, Paris, 2006
- [6] S. Huguet, Application de classificateurs aux données d'émission acoustique : identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polymère, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, 2002
- [7] A. Marec, J.H. Thomas, R. El Guerjouma, Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008; 22 (6): 1441–64
- [8] Logiciel NOESIS, Advanced Acoustic Emission Data Analysis Pattern Recognition and Neural Networks Software
- [9] DL. Davies, DW. Bouldin, A cluster separation measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 1979; 1: 224–27.