Détection et discrimination par émission acoustique des endommagements dans les composites. Comparaison expérience / modélisation

H.Y. Chou, Hasnae Zejli, Alain Thionnet, Anthony R. Bunsell, A. Mouritz, M. Bannister

▶ **To cite this version:**

H.Y. Chou, Hasnae Zejli, Alain Thionnet, Anthony R. Bunsell, A. Mouritz, et al.. Détection et discrimination par émission acoustique des endommagements dans les composites. Comparaison expérience / modélisation. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.31. hal-00597895

HAL Id: hal-00597895
https://hal.science/hal-00597895

Submitted on 2 Jun 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.

Détection et discrimination par émission acoustique des endommagements dans les composites. Comparaison expérience / modélisation

Damage detection and discrimination by acoustic emission in composite materials. Comparison between experiment and modelling

H.Y. Chou[2], H. Zejli[1], A. Thionnet[1,4], A. Bunsell[1], A. Mouritz[2], M. Bannister[3]

1 - Mines ParisTech, Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633, BP 87, 91003 Evry cedex, France
e-mail : hasnae.zejli@ensmp.fr, alain.thionnet@ensmp.fr, anthony.bunsell@ensmp.fr
2 - Royal Melbourne Institute of Technology University, Australie
e-mail : s3051388@student.rmit.au, adrian.mouritz@rmit.edu.au
3 - Cooperative Research Centre for Advanced Composite Structures Ltd. (CRC-ACS), Australie
e-mail : m.bannister@crc-acs.com.au
4 - Université de Bourgogne, Mirande, BP 47870, 21078 Dijon, France

Résumé

On présente dans cette étude la discrimination des phénomènes de ruptures de fibre, de microfissuration intralaminaire, de macrofissuration intralaminaire ainsi que du microdélaminage au sein des composites stratifiés d'unidirectionnels orientés, dans le cadre d'une méthode de détection des endommagements basée sur la technique de l'Emission Acoustique. Ces résultats expérimentaux sont confrontés aux prévisions issues d'un modèle de comportement de matériaux composites unidirectionnels, basés sur la physique des phénomènes à l'échelle des constituants.

Abstract

This study presents the discrimination of fibre breaks, intralaminar microcracking and macrocracking and microdelamination within composite laminates by using acoustic emission. These experimental results are compared with simulations of the behaviour of a unidirectional composite taking into account this damage phenomena at the microscale.

Mot Clés : endommagement, détection, émission acoustique, rupture de fibre, fissuration
Keywords : damage, detection, acoustic emission, fibre break, microcracks

1 But de l'étude

Les composites unidirectionnels carbone/époxy sont de plus en plus utilisés comme matériaux constitutifs de partie de structures industrielles. Les dégradations qui peuvent apparaître au sein de ces matériaux sont préjudiciables pour la tenue mécanique de la structure. Parmi ces dégradations on trouve en particulier la rupture des fibres qui provoque si elle devient importante en terme de densité, la ruine totale et brutale de la structure. C'est essentiellement ce phénomène que l'on étudie ici de manière locale (c'est-à-dire à l'échelle de la fibre), aussi bien en termes de ses causes qu'en termes de ses conséquences.

Mais ce n'est pas le seul objectif de cette étude. En fait, la nécessité de détecter les endommagements dans les structures composites afin d'appréhender toute au long de leur vie, leur niveau de sécurité, fait que les méthodes de détection d'endommagements se développent de manière importante. Parmi toutes les méthodes existantes, celle qui utilise la technique de l'émission acoustique a déjà prouvé ses capacités lorsque le phénomène de rupture de fibres est très majoritairement présent dans la structure [1]. Néanmoins, pour cette méthode (comme pour d'autres d'ailleurs), il se pose le problème de savoir quels évènements sont détectés dès lors que plusieurs phénomènes d'endommagement sont simultanément en présence dans l'objet à expertiser. Ainsi, un second objectif de l'étude est de montrer la discrimination lors de la détection par émission acoustique qui a été faite des principaux endommagements présents dans les composites stratifiés : ruptures de fibres, microfissuration et (macro)fissuration intralaminaires, microdélaminages (qui apparaissent en pointe du phénomène de fissuration intralaminaire).

On compare les discriminations faites pour le phénomène de ruptures de fibre et celui de fissuration intralaminaire avec des modèles existants de ces phénomènes.

2 Détection et discrimination des endommagements dans les composites stratifiés d'unidirectionnels

2.1 Les essais réalisés

La réponse acoustique des composites unidirectionnels carbone/époxy (0°), (90°) et des stratifiés ($0°_2$, $90°_4$, $0°_2$) et ($90°_2$, $0°_4$, $90°_2$) a été étudiée lors d'essais de traction.

Pour un unidirectionnel (0°) sous sollicitation de traction uniaxiale, la rupture les fibres est le principal mécanisme d'endommagement. La signature acoustique de ce phénomène a été identifiée à l'aide de ces essais.

Pour un unidirectionnel (90°) sous sollicitation de traction uniaxiale, le principal mécanisme d'endommagement est celui de dégradation de la matrice dans lequel on distingue :

- celui que l'on qualifie de microfissuration (qui est en fait la décohésion fibre/matrice) ;
- celui qui est la coalescence de la microfissuration et que l'on appellera ici fissuration ;
- et enfin, celui qui est le résultat de la coalescence de la fissuration, qui est en fait, celui qui est usuellement qualifié de fissuration "transverse" et qui sera ici appelé macrofissuration.

La signature acoustique des phénomènes de micro et macrofissuration a été identifiée à l'aide de ces essais.

Pour les stratifiés ($0°_2$, $90°_4$, $0°_2$) et ($90°_2$, $0°_4$, $90°_2$), aux mécanismes d'endommagements précédents, il vient se rajouter celui de microdélaminage, défini comme un décollement local interpli (ici 0°/90°). Ce phénomène est favorisé par la présence des macrofissures pour lesquelles les pointes en sont des sites privilégiés d'apparition. Ce phénomène est moins important en termes d'activité (et d'observation par microscopie optique) dans la stratification ($0°_2$, $90°_4$, $0°_2$) que dans la stratification ($90°_2$, $0°_4$, $90°_2$) car les macrofissures y sont moins nombreuses et apparaissent avec un niveau de contraintes plus élevé (dû à l'effet de confinement). Les mesures d'émission acoustiques réalisées sur ces séquences ont eu pour objectif de discriminer les différents types d'endommagements en réalisant la séparation des populations des signaux provenant des différents types d'endommagements (rupture des fibres, délaminage, microfissuration et macrofissuration).

2.2 Méthode d'analyse et de classification

L'identification des signatures acoustiques des mécanismes d'endommagements apparaissant dans les éprouvettes a été possible grâce à l'utilisation de différentes méthodes d'analyse des signaux enregistrés. Ce travail couple l'analyse fréquentielle des formes d'ondes, l'analyse multiparamétrique et l'analyse statistique par les réseaux de neurones.

La corrélation de plusieurs paramètres d'émission acoustique a permis la classification des différentes populations de signaux provenant des dégradations dans la matrice, enregistrés sur les essais réalisés avec les éprouvettes à (90°) :

- d'abord l'apparition des microfissures : amplitudes inférieures à $60dB$;
- ensuite l'accumulation des microfissures pour donner des fissures : amplitudes entre $60dB$ et $74dB$;
- enfin la coalescence des fissures induisant la formation des macrofissures. Ces dernières sont caractérisées par des signaux avec des longues durées ($> 100\mu s$), des fortes amplitudes ($> 75dB$), des fortes énergies et des barycentres fréquentiels faibles ($< 400kHz$).

Concernant la discrimination des microfissures et des ruptures de fibre pour lesquelles l'émission acoustique a été réalisée sur les essais respectivement à (90°) et (0°), l'analyse multiparamétrique classique n'a pas permis de distinguer significativement les signaux : les deux phénomènes ont des signatures acoustiques très semblables. Ils sont caractérisés par des faibles amplitudes, des faibles énergies, des faibles durées et des barycentres fréquentiels élevés ($>$ 400 kHz). Ces deux types d'endommagement ont été discriminés en utilisant l'analyse de puissance partielle qui permet de déterminer la bande fréquentielle la plus dominante dans le spectre de puissance obtenue par transformée de Fourier rapide des formes d'onde : les spectres fréquentiels des formes d'ondes détectés lors des essais de traction sur les éprouvettes (90°) et (0°) présentent une différence (Fig. 1).

Concernant la discrimination des différents mécanismes d'endommagement présents dans les éprouvettes ($0°_2$, $90°_4$, $0°_2$) et ($90°_2$, $0°_4$, $90°_2$), la méthode précédente permet de classer 80 % des signaux dans le (90°) et 80% des signaux dans le (0°). Afin d'améliorer et de compléter la séparation des différents mécanismes d'endommagement, à l'aide du logiciel Noesis développé par Euro Physical Acoustics, différentes méthodes statistiques ont été appliquées en effectuant une analyse en composantes principales et la reconnaissance de modèles par réseaux de neurones. Grâce à l'ensemble de ces méthodes, les différents mécanismes d'endommagement présents dans les éprouvettes ($0°_2$, $90°_4$, $0°_2$) et ($90°_2$, $0°_4$, $90°_2$) ont été révélés (Tab. 1) :

- le microdélaminage : l'émission acoustique liée à ce phénomène est la plus énergétique ;
- la discrimination du phénomène de fissuration a été comparée à une observation in-situ par microscopie optique : les deux techniques donnent exactement les mêmes résultats (Fig. 2) ;
- les ruptures de fibres (Fig. 3).

Séquence / Phénomène	Rupture de fibre	Microfissures	Macrofissures	Microdélaminage
($0°_2$, $90°_4$, $0°_2$) (a)	64.66 %	32.57 %	0.34 %	2.40 %
($0°_2$, $90°_4$, $0°_2$) (b)	69.74 %	27.50 %	0.37 %	2.40 %
($90°_2$, $0°_4$, $90°_2$) (a)	80.37 %	7.86 %	3.19 %	7.60 %
($90°_2$, $0°_4$, $90°_2$) (b)	79.86 %	8.38 %	3.67 %	8.10 %

Tab. 1 – Pourcentage de la population des signaux obtenus par émission acoustique, de chaque endommagement présent dans les éprouvettes ($0°_2$, $90°_4$, $0°_2$) et ($90°_2$, $0°_4$, $90°_2$)

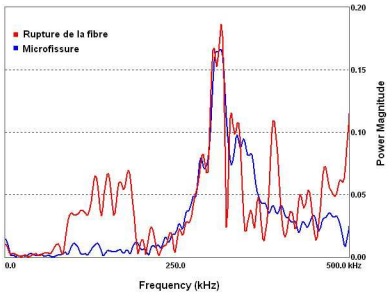


Fig. 1 – Détection par émission acoustique : comparaison des spectres fréquentiels des formes d'ondes des ruptures des fibres et des microfissures.

3 Modélisations des endommagements dans les composites stratifiés d'unidirectionnels : rupture de fibre, fissuration intralaminaire

3.1 Modélisation du phénomène de rupture de fibre

L'étude de la rupture d'un unidirectionnel est l'objet, depuis de nombreuses années, d'investigations analytiques et statistiques, plus rarement numériques et prenant en compte ou non le caractère viscoélastique de la matrice. On peut, par exemple, citer les travaux suivants : Rosen [2], Cox [3], Zweben [4], Hedgepeth [5], Ochiai *et al.* [6], Goree and Gross [7], Harlow and Phoenix [8] [9], Scop and Argon [10] [11], Kong [12], Batdorf [13] [14], Nedele and Wisnom [15] [16], Hedgepeth and Van Dyke [17], Baxevanakis [18], Landis *et al.* [19] [20], Phoenix *et al.* [21] [22], Wisnom [23], Van Den Heuvel *et al.* [24] [25], Lipschitz and Rotem [26], Lagoudas *et al.* [27], Beyerlein *et al.* [28].

Dans notre cas, le phénomène de rupture de fibre au sein d'un composite unidirectionnel est étudié à l'échelle microscopique qui est l'échelle qui voit les fibres et la matrice du composite comme des milieux homogènes. Le repère local du matériau associé à l'échelle microscopique est le repère orthonormé direct $R_{loc} = (O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ pour lequel (x, y, z) désigne les coordonnées d'un point M. Le vecteur $\vec{z}$ est aligné avec l'axe des fibres.

Les travaux de Blassiau [1] [29] [30] [31] et ceux de Baxevanakis [18] ont dans un premier temps permis d'identifier la microstructure du Volume Elémentaire Représentatif (VER) du matériau sain (i.e., non endommagé, i.e., sans rupture de fibre).

Si l'on suppose que le matériau est périodique, et que l'arrangement des fibres est hexagonal dans le plan $(\vec{x}, \vec{y})$, la cellule périodique représentative du VER du matériau sain (baptisée CS32) est constituée de 32 fibres. Sa géométrie est prise comme étant un parallélépipède dont la section orthogonale au vecteur $\vec{z}$ est un carré de côté c. En ce qui concerne sa longueur suivant l'axe des fibres, elle a été identifiée par Baxevanakis [18] à 8 mm et est comprise entre les plans $z = 0$ et $z = L = 8$ mm. L'origine O du repère R_{loc} est le centre géométrique de la section contenue dans le plan $z = 0$. A cette échelle, au point M, le tenseur des contraintes est noté σ, le tenseur des déformations est noté ε.

A cette échelle, on a construit (Blassiau *et al.*, [1] [29] [30] [31]) un modèle du phénomène de rupture de fibre et de ses conséquences, qui tient compte :

- du caractère aléatoire et inhomogène de la valeur à rupture longitudinale d'une fibre le long de son axe. On prend en compte également en compte la variation du module de Weibull lorsque l'on considère un petit nombre de fibres (ici, 32) prises parmi un très grand nombre (Berger et Jeulin [32]) ;
- du nombre de ruptures de fibre au sein du VER au travers de 5 états d'endommagement qui permettent de passer de la microstructure saine à celle totalement endommagée. Ces 5 états d'endommagement sont symbolisés par la cellule représentative de leur VER. Ces cellules sont baptisées : C32, C16, C8, C4, C2. Elles contiennent respectivement $N = 1, 2, 4, 8, 16$ fibres rompues parmi les 32 fibres présentes dans la cellule CS32 ;
- du transfert de charge axiale vers les fibres intactes induit par les ruptures de fibre ;
- du transfert de charge axiale induit par l'existence d'une décohésion fibre/matrice existant à l'endroit d'une rupture de fibre ;
- du transfert de charge axiale induit par l'existence du caractère viscoélastique (supposé linéaire) de la matrice ;
- de la fraction volumique de fibres locale (selon une distribution aléatoire de type Weibull).

Le coefficient de transfert de charge longitudinale est défini par :

$$k_r\left(C, d, t, V_f, Z\right) = \frac{\int_{Z_i}^{Z_{i+1}} \int_{S_F} \sigma_{zz}\left(C, d, t, V_f, x, y, z\right) dxdydz}{\int_{Z_i}^{Z_{i+1}} \int_{S_F} \sigma_{zz}\left(CS32, d = 0, t = 0, V_f, x, y, z\right) dxdydz}$$

où

- C désigne la cellule représentative de l'état d'endommagement considéré ;
- d est la longueur de décohésion ;
- t est le temps après rupture d'une fibre ;
- V_f est la fraction volumique de fibres ;
- z est la coordonnée selon l'axe de la fibre mesurée à partir du plan de la rupture $(z = 0)$;
- Z_{i+1} et Z_i sont les abscisses des sections droites entre lesquelles est calculé le coefficient k_r ;
- $Z = \frac{Z_{i+1}+Z_i}{2}$;
- S_F désigne la section droite courante de la fibre considérée ;
- x, y désignent les coordonnées décrivant la section droite de la cellule ;
- σ_{zz} est la contrainte axiale dans la fibre considérée.

Qu'il existe ou non une décohésion à l'interface fibre rompue/matrice, que le comportement de la matrice soit viscoélastique ou non, la définition donnée pour le coefficient k_r reste valable.

3.2 Modélisation du phénomène de fissuration intralaminaire

Les modèles d'endommagement souhaitant décrire les phénomènes de fissuration ne vérifient généralement pas l'ensemble des conditions requises à la validité d'un modèle pour ce type de phénomène :

- $(c1)$: la loi de comportement doit être continue ;
- $(c2)$: l'anisotropie induite par l'endommagement doit être décrite ;
- $(c3)$: la dégradation des propriétés du matériau doit être faite de manière cohérente ;
- $(c4)$: le contact unilatéral du dommage doit être pris en compte ;

– la vérification des Grands Principes de la Physique et de la Mécanique doit être respectée, à savoir que le modèle doit être :
  . $(c5)$: S-invariant (où S indique le groupe des symétries matérielles) ;
  . $(c6)$: objectif ;
  . $(c7)$: thermodynamiquement admissible.

La modélisation utilisée ici répond à chacune de ces contraintes et est construite sur l'extension de la notion de Mode d'Ouverture d'une fissure qui existe en Mécanique de la Rupture, à la notion de Mode d'Ouverture d'un réseau de microfissures pour la Mécanique de l'Endommagement. Ainsi les notions de Mode I, Mode II et Mode III de la Mécanique de la Rupture sont adaptées au cadre de la Mécanique de l'Endommagement par des variables d'état susceptibles de décrire tous ces modes d'ouverture mais aussi tous ceux intermédiaires. C'est l'utilisation de ce concept original qui permet d'assurer la cohérence complète du modèle de comportement proposé. Le travail est basé sur les approches de Talreja [33] [34], Leguillon et Sanchez [35], Allen *et al.* [36] [37] [38], Andrieux [39] et Thionnet *et al.* [40] [41] (on trouvera l'intégralité des détails dans [42]).

Le tenseur des déformations macroscopique est pris comme variable d'état. Sa variable associée est le tenseur des contraintes macroscopique. La modélisation de l'endommagement est faite au travers de 4 variables d'état scalaires : α caractérise l'endommagement quantitativement, m_{23}, r_1 et r_{23}, caractérisent la géométrie de l'endommagement. Les trois dernières variables traduisent dans le langage de la Mécanique de l'Endommagement, la notion de mode d'ouverture de la Mécanique de la Rupture.

4 Simulations sur un unidirectionnel à 0° : prise en compte de l'aspect aléatoire de la fraction volumique locale. Comparaisons avec l'expérience

L'arrangement réel des fibres est aléatoire au sein du matériau et donc modifie la fraction volumique locale V_f. Ici, cette prise en compte est faite de manière détournée en supposant que la fraction volumique au sein de la cellule CS32, change. Afin d'obtenir la courbe de probabilité de la fraction volumique de fibres locale dans le matériau, on procède à l'analyse d'une ou plusieurs sections droites d'éprouvettes parallélépipèdiques distinctes. On obtient ainsi des points dont le lissage par une fonction de probabilité de Weibull permet de connaître la probabilité de la valeur locale de la fraction volumique de fibres.

Pour le calcul par Eléments Finis, si le maillage possède n points de Gauss, on découpe l'intervalle de $V_f = 0$ à sa valeur maximale $V_f = V_f^{MAX}$ en n morceaux, qui donnent n valeurs pour la fraction volumique locale. Ensuite, on met en place un processus de tirage aléatoire qui "désordonne" le découpage fait puis affecte les valeurs aux n points de Gauss successifs.

Le calcul présenté ici utilise la probabilité de répartition de la fraction volumique identifiée sur l'ensemble des observations faites les éprouvettes concernées (Fig. 4).

5 Simulations sur un stratifié comportant des plis à 0° et à 90° : prise en compte de l'aspect aléatoire de la rupture de fibres avec ou sans le phénomène de fissuration intralaminaire. Comparaisons avec l'expérience

Les simulations modélisent les essais sur les séquences $(0°_2, 90°_4, 0°_2)$ et $(90°_2, 0°_4, 90°_2)$ en prenant ou non en compte le phénomène de fissuration intralaminaire (qui n'apparait finalement que dans les plis à 90°). La fraction volumique est supposé uniforme et égale à 0.64 (plus forte probablement que celle des essais expérimentaux réalisés ici et qui n'a pas été recherchée pour le matériau utilisé). La zone d'écoute de l'infrastructure de détection par la technique d'émission acoustique est de $80mm$. C'est cette partie qui est simulée. Les figures portent les résultats de détection des évènements entendus dans cette zone (fissurations et ruptures de fibre qui ont été discriminés), mais également, pour les ruptures de fibre ceux des évènements qui ont pu être localisés.

La discrimination du phénomène de fissuration par émission acoustique a été utilisée pour identifier le modèle de fissuration intralaminaire (Fig. 2). Les résultats présentés sont le nombre de ruptures de fibre (détectées ou simulées) divisé par le volume total (donc qui prend en compte toute l'épaisseur du stratifié) de la zone d'écoute : il s'agit donc d'une densité (par mm^3).

La prise en compte du phénomène de fissuration intralaminaire a pour effet de rendre plus précoce et plus rapide le phénomène de ruptures de fibres. En effet, les fissures intralaminaires qui apparaissent dans les couches à 90° dégradent les propriétés de ces plis et donc accroissent la charge supportée par les plis à 0° : la valeur de la contrainte axiale présente dans les fibres est donc accrue lorsque l'on prend en compte ce phénomène dans la modélisation (Fig. 6, Fig. 5).

6 Conclusion

Basés sur les travaux antérieurs de Blassiau [1] [29] [30] [31], on a comparé les résultats d'une modélisation des phénomènes d'endommagement dans les composites stratifiés d'unidirectionnels et la détection et la discrimination qui en a été faite par une méthode de type contrôle non destructif utilisant la technique de l'Emission Acoustique.

On constate finalement que l'ensemble des résultats se corrèlent de manière satisfaisante. Une remarque importante qui doit être faite cependant est que le phénomène de rupture de fibres et celui de microfissuration ont des signatures acoustiques voisines pour lesquelles la discrimination qui en a été faite a nécessité des critères plus fins que ceux usuels.

Remerciements - Les auteurs souhaitent vivement remercier la société Air Liquide non seulement pour le financement qu'elle a apporté à cette étude, mais également pour l'ambiance de travail que les personnels impliqués ont y donné. Il en est ainsi ressorti une véritable collaboration constructive et enrichissante que les auteurs souhaitent souligner.

Références

[1] S. Blassiau. Modélisation des phénomènes microstructuraux au sein d'un composite unidirectionnel carbone/époxy et prédiction de durée de vie : contrôle et qualification de réservoirs bobinés. *Thèse, Ecole des Mines de Paris*, 2005.

[2] B.W. Rosen. Tensile failure of fibrous composites. *AIAA journal*, 2 :1985–1991, 1964.

[3] H.L. Cox. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials. *British journal of applied physics*, 12 :72–79, 1951.

[4] C. Zweben. Tensile failure of fibers composites. *AIAA journal*, 6 :2325–2331, 1968.

[5] J.M. Hedgepeth. Stress concentrations in filamentary structures. *Rapport, NASA TND882, Langley research center*, 1961.

[6] S. Ochiai, K. Schulte, and P.W. Peters. Strain concentration for fibers and matrix in unidirectional composites. *Composites science and technology*, 41 :237–256, 1991.

[7] J.G. Goree and R. Gross. Stresses in a three-dimensional unidirectional composite containing broken fibers. *Engineering fracture mechanics*, 13 :395–405, 1980.

[8] D.G. Harlow and S.L. Phoenix. The chain-of-bundles probability model for the strength of fibrous materials 1 : Analysis and conjectures. *Journal of composite materials*, 12 :195–213, 1978.

[9] D.G. Harlow and S.L. Phoenix. The chain-of-bundles probability model for the strength of fibrous materials 2 : a numerical study of convergence. *Journal of composite materials*, 12 :314–334, 1978.

[10] P.M. Scop and A.S. Argon. Statistical theory of strength of laminated composites. *Journal of composite materials*, 1 :92–99, 1967.

[11] P.M. Scop and A.S. Argon. Statistical theory of strength of laminated composites 2. *Journal of composite materials*, 3 :30–44, 1969.

[12] P. Kong. A monte carlo study of the strength of unidirectional fiber-reinforced composites. *Journal of composite materials*, 13 :311–327, 1979.

[13] S.B. Batdorf. Tensile strength of unidirectionally reinforced composites - 1. *Journal of reinforced plastics and composites*, 1 :153–163, 1982.

[14] S.B. Batdorf. Tensile strength of unidirectionally reinforced composites - 2. *Journal of reinforced plastics and composites*, 1 :165–175, 1982.

[15] M.R. Nedele and M.R. Wisnom. Three dimensional finite analysis of the stress concentration at a single fibre break. *Composites science and technology*, 51 :517–524, 1994.

[16] M.R. Nedele and M.R. Wisnom. Stress concentration factors around a broken fibre in a unidirectional carbon fibre-reinforced epoxy. *Composites*, 25 :549–557, 1994.

[17] J.M. Hedgepeth and P. Van Dyke. Local stress concentrations in imperfect filamentary composite materials. *Journal of composite materials*, 1 :294–309, 1967.

[18] C. Baxevanakis. Comportement statistique à rupture des composites stratifiés. *Thèse, Ecole des Mines de Paris*, 1994.

[19] C.M Landis and R.M. McMeeking. Stress concentrations in composites with interface sliding, matrix stiffness and uneven fiber spacing using shear lag theory. *International journal of solids and structures*, 36 :4333–4361, 1999.

[20] C.M Landis, I.J. Beyerlein, and R.M. McMeeking. Micromechanical simulation of the failure of fiber reinforced composites. *Journal of the mechanics and physics of solids*, 48 :621–648, 2000.

[21] S.L. Phoenix. Statistical issues in the fracture of brittle matrix fibrous composites : localized load-sharing and associated size effects. *International Journal of Solids and Structures*, 34 :2649–2668, 1997.

[22] S.L. Phoenix and I.J. Beyerlein. Statistical strength theory for fibrous composite materials. *in Comprehensive composite materials*, Pergamon-Elsevier Science, A. Kelly and C. Zweben editors :559–639, 2000.

[23] M.R. Wisnom and D. Green. Tensile failure due to interaction between fibre breaks. *Composites*, 26 :499–508, 1995.

[24] P.W.J. Van den Heuvel, S. Goutianos, R.J. Young, and T. Peijs. Failure phenomena in fibre-reinforced composites part 6 : a finite element study of stress concentrations in unidirectional cfr epoxy composites. *Composites science and technology*, 64 :645–656, 2004.

[25] P.W.J. Van den Heuvel, M.K Wubbolts, R.J. Young, and T. Peijs. Failure phenomena in two-dimensional multi-fibre model composites : 5. a finite element study. *Composites A*, 29 :1121–1135, 1998.

[26] J.M. Lifschitz and A. Rotem. Time-dependent longitudinal strength of unidirectional fibrous composites. *Fibre science and technology*, 3 :1–20, 1970.

[27] D.C. Lagoudas, C.Y. Hui, and S.L. Phoenix. Time evolution of overstress profiles near broken fibers in a composite with a viscoelastic matrix. *International journal of solids and structures*, 25 :45–66, 1989.

[28] I.J. Beyerlein, C.H. Zhou, and L.S. Schadler. Time evolution of stress redistribution around multiple fiber breaks in a composite with viscous and viscoelastic matrices. *International journal of solids and structures*, 35 :3177–3211, 1998.

[29] S. Blassiau, A. Thionnet, and A. Bunsell. Micromechanisms of load transfert in a unidirectional carbon-fibre epoxy composite due to fibre failures. part 1 : Micromechanisms and 3d analysis of load transfert, the elastic case. *Composite Structures*, 74 :303–318, 2006.

[30] S. Blassiau, A. Thionnet, and A. Bunsell. Micromechanisms of load transfert in a unidirectional carbon-fibre epoxy composite due to fibre failures. part 2 : Influence of viscoelastic and plastic matrices on the mechanism of load transfert. *Composite Structures*, 74 :319–331, 2006.

[31] S. Blassiau, A. Thionnet, and A. Bunsell. Micromechanisms of load transfert in a unidirectional carbon-fibre epoxy composite due to fibre failures. part 3 : multiscale reconstruction of composite behaviour. *Composite Structures*, 83 :312–323, 2008.

[32] M.H. Berger and D. Jeulin. Statistical analysis of the failure stresses of ceramic fibres : Dependence of the weibull parameters on the gauge length, diameter variation and fluctuation of defect density. *Journal of Materials Sciences*, 38 :2913–2923, 2003.

[33] R. Talreja. Fatigue of composite materials. *Technical University of Denmark*, 1985.

[34] R. Talreja. Continuum modelling of damage in ceramic matrix composites. *Mechanics of Materials*, 12 :165–180, 1991.

[35] D. Leguillon and E. Sanchez-Palencia. On the behaviour of a cracked elastic body with or without friction. *Journal de Mécanique Théorique et Appliquée (1)*, 2 :195–209, 1982.

[36] D.H. Allen, C.E. Harris, and S.E. Groves. A thermomechanical constitutive theory for elastic composites with distributed damage, parts I and II. *International Journal of Solids and Structures*, 23(9) :1301–1338, 1987.

[37] D.H. Allen. Homogenization principles and their application to continuum damage mechanics. *Composites sciences and technology*, 61 :2223–2230, 2001.

[38] J. Lee, C.E. Harris, and D.H. Allen. Internal state variable approach for predicting stiffness reduction in fibrous laminated composites with matrix cracks. *Journal of Composite Materials*, 23 :1273–1291, 1989.

[39] S. Andrieux. Un modèle de matériau microfissuré, applications aux roches et aux bétons. *Thèse, Université Paris 6, France*, 1983.

[40] E. Aussedat, A. Thionnet, and J. Renard. Comportement en compression des composites par une définition du mode de sollicitation en mécanique de l'endommagement. *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Série II*, 321 :533–540, 1995.

[41] A. Thionnet. A model for the recovery of thermomechanical properties in strongly anisotropic damaged materials. *Journal of Composite Materials*, 35 :731–750, 2001.

[42] A. Thionnet. From fracture to damage mechanics : A behavior law for microcracked composites using the concept of crack opening mode. *Composite Structures*, 92 :780–794, 2010.

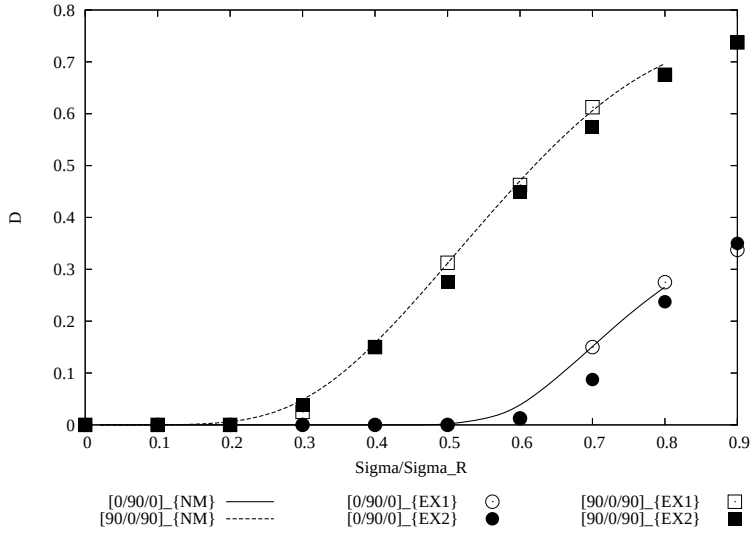


FIG. 2 – Densité de fissuration intralaminaire (sur la totalité du volume de l'éprouvette) détectée par émission acoustique dans la zone d'écoute (D, nb/mm^3) en fonction de la contrainte normée longitudinale appliquée et identification. Les symboles indiquent les points expérimentaux, les lignes continues ou discontinues indiquent l'identification réalisée pour le modèle de fissuration.

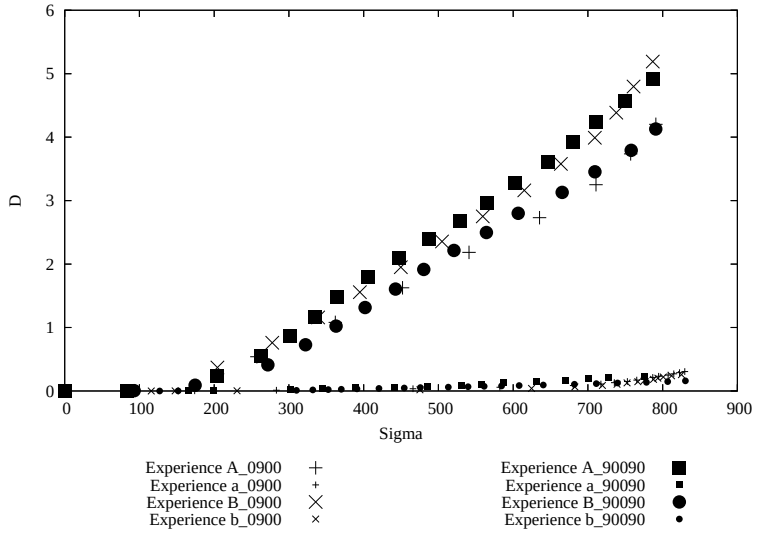


FIG. 3 – Densité de ruptures de fibre (sur la totalité du volume de l'éprouvette) détectée par émission acoustique dans la zone d'écoute (D, nb/mm^3) en fonction de la contrainte longitudinale appliquée (Sigma, MPa) pour les séquences ($0°_2$, $90°_4$, $0°_2$) et ($90°_2$, $0°_4$, $90°_2$) détectée par la technique de l'émission acoustique. Les symboles de grande taille indiquent la totalité des évènements détectés dans la zone d'écoute, les symboles de petite taille indiquent les seuls évènements détectés dans la zone d'écoute qui ont pu être localisés.

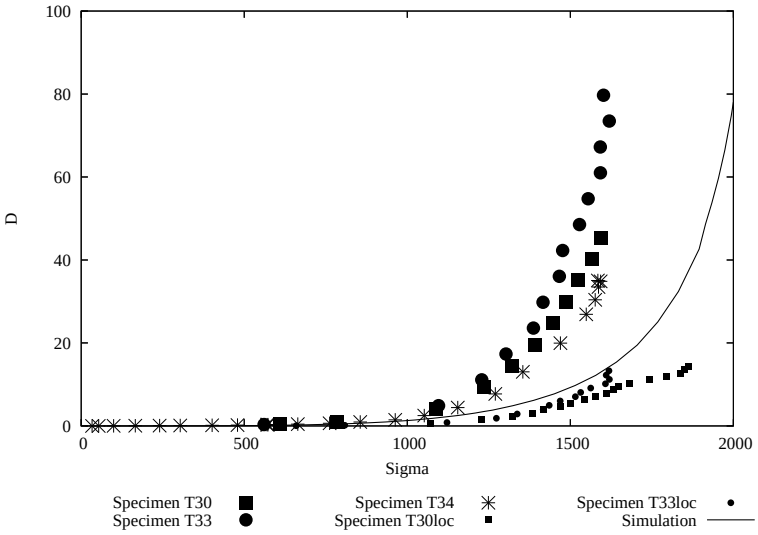


FIG. 4 – Densité de ruptures de fibre (sur la totalité du volume de l'éprouvette) détectée par émission acoustique dans la zone d'écoute (D, nb/mm^3) en fonction de la contrainte longitudinale appliquée (Sigma, MPa). Comparaison entre la modélisation et la détection par émission acoustique ("TXY" et "TXYloc" indiquent respectivement les évènements détectés dans la zone d'écoute et les seuls évènements détectés dans la zone d'écoute qui ont pu être localisés). La fraction volumique de fibre est la fraction réelle.

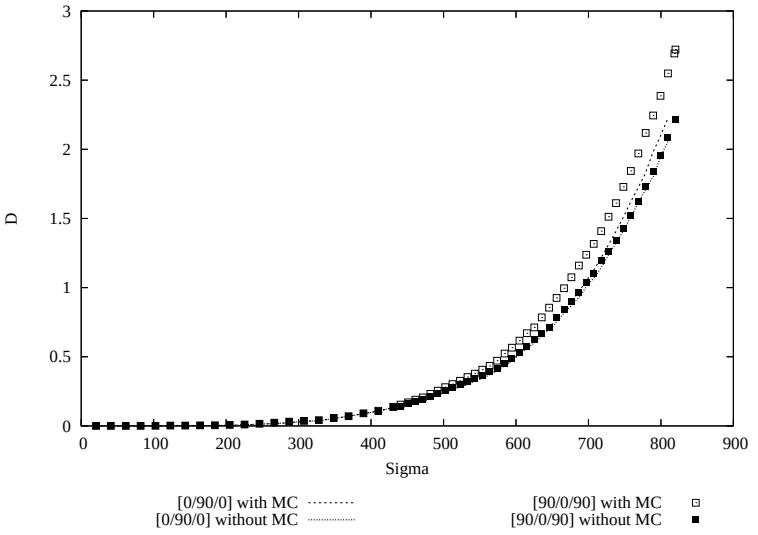
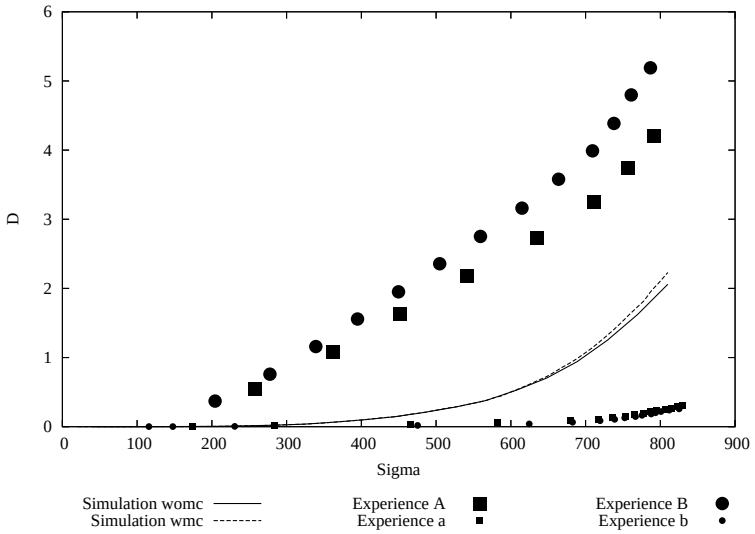
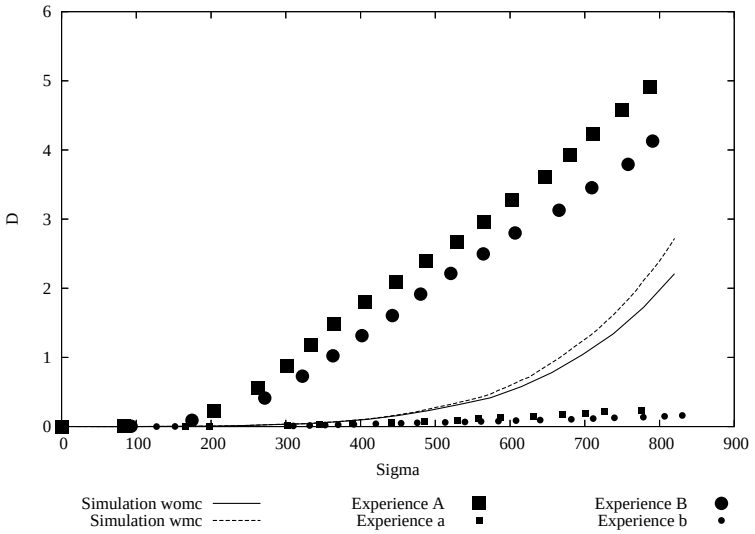


FIG. 5 – Densité de ruptures de fibre (sur la totalité du volume de l'éprouvette) (D, nb/mm^3) en fonction de la contrainte longitudinale appliquée ($Sigma$, MPa) pour les séquences ($0°_2$, $90°_4$, $0°_2$) et ($90°_2$, $0°_4$, $90°_2$) avec prise en compte ou non du phénomène de fissuration intralaminaire. Simulation.



(a)



(b)

FIG. 6 – Densité de ruptures de fibre (sur la totalité du volume de l'éprouvette) (D, nb/mm^3, Expérience A/B : évènements détectés dans la zone d'écoute, Expérience a/b : évènements détectés dans la zone d'écoute et localisés, wmc : simulation avec prise en compte de la fissuration intralaminaire, womc : simulation sans prise en compte de la fissuration intralaminaire) en fonction de la contrainte longitudinale appliquée ($Sigma$, MPa) avec prise en compte ou non du phénomène de fissuration intralaminaire. Comparaison entre la simulation et la détection par émission acoustique. (a) ($0°_2$, $90°_4$, $0°_2$) (b) ($90°_2$, $0°_4$, $90°_2$)