

DETECTION DES RUPTURES DE FIBRE ET DU DELAMINAGE DANS LES COMPOSITES VERRE/EPOXY ET CARBONE/EPOXY A L'AIDE DE STRUCTURES PROPAGATIVES DANS LA GAMME DES MICRO-ONDES

FIBRE BREAKS AND DELAMINATION DETECTION IN COMPOSITES BY USING PROPAGATIVE STRUCTURES IN THE MICROWAVES FREQUENCIES

J. Rossignol^{1,3}, A. Thionnet^{2,3}

1 - Institut Carnot de Bourgogne, CNRS UMR 5209

2 - Mines ParisTech, Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633, BP 87, 91003 Evry cedex, France

3 - Université de Bourgogne, Mirande, BP 47870, 21078 Dijon, France

e-mail : jerome.rossignol@u-bourgogne.fr, alain.thionnet@ensmp.fr

RESUME

On présente dans cet article la détection de ruptures de fibre et du délaminage dans les composites unidirectionnels verre/époxy et carbone/époxy en utilisant des structures propagatives électromagnétiques dans la gamme des micro-ondes.

ABSTRACT

In this article, we present the detection of fibre breaks and delamination on carbon/epoxy and glass epoxy unidirectional composites by using an electromagnetic propagative structure submitted to microwave.

Mots clés : détection d'endommagement, composites, caractérisation diélectrique, micro-ondes, méthodes expérimentales

Keywords : damage detection, composites, dielectric characterisation, microwaves, experimental method

1 But de l'étude

Cette étude propose une méthode de détection de ruptures de fibre et de délaminage dans les composites unidirectionnels (verre/époxy et/ou carbone/époxy) utilisant des structures propagatives électromagnétiques dans la gamme des micro-ondes. S'ils peuvent évidemment se propager dans l'espace, les champs électromagnétiques sont propagés le plus couramment dans des guides d'ondes, des lignes bifilaires et des lignes propagatives comme par exemple les circuits microrubans.

Une ligne propagative de type circuit microruban (Fig. 1) se compose d'un substrat dont l'une des faces est métallisée (par un film de cuivre collé dans notre cas), jouant le rôle de plan de masse. L'autre n'est recouverte que partiellement (quelques cm²) de métal sous la forme d'un motif conducteur : c'est le ruban. La forme du motif, aux gammes de fréquences utilisées, confère au microruban une fonction électronique de base, soit de filtre soit de résonateur. L'étude de la propagation d'un champ électromagnétique dans un circuit microruban est rendue difficile en raison d'une propagation qui s'effectue simultanément dans le substrat, mais également dans l'air. Cependant, deux hypothèses légitimes en première approximation sont couramment faites : les modes de propagation des champs sont à dominante de type Transverse ElectroMagnetic (TEM) et les milieux testés sont à faibles pertes diélectriques. On adopte ces hypothèses pour cette étude. Dans ces conditions et dans le cas où le circuit est résonant, on peut définir pour la structure de propagation concernée, notamment, une fréquence de résonance, notée f_c . L'accès expérimental à la valeur de f_c se fait de manière indirecte. Plus précisément, on utilise un analyseur de réseaux vectoriel sur le plan fréquentiel relié par un câble coaxial à l'une des extrémités du ruban, l'autre extrémité du ruban étant soit reliée à une impédance de valeur donnée et fixe, soit mise en court-circuit avec le plan de masse. On définit le plan de référence des mesures à l'entrée du ruban. Dans ce plan, l'analyseur de réseaux mesure l'onde électromagnétique incidente qu'il émet et l'onde réfléchie pour laquelle on associe, pour ce plan, un coefficient de réflexion complexe appelé usuellement S_{11} et noté ici Γ . Les mesures du coefficient Γ en fonction de la fréquence permettent d'identifier f_c .

Les grandeurs Γ et f_c dépendent de la géométrie du ruban et du substrat. Elles dépendent aussi des propriétés physiques des matériaux qui les constituent, notamment de la permittivité diélectrique relative ϵ_r du matériau constitutif du substrat. Toutes ces grandeurs étant fixées, en première approximation, f_c et ϵ_r ne dépendent plus que de la fréquence de l'onde qui parcourt le circuit. En ce qui concerne ϵ_r , cette dépendance est très faible pour les milieux que l'on étudie ici. On suppose donc implicitement admis dans la suite que la permittivité des milieux utilisés comme substrat est constante vis-à-vis de la fréquence.

2 Principe de la méthode de détection des endommagements

Notre objectif est de détecter des endommagements susceptibles d'apparaître au sein d'un matériau composite, en utilisant des lignes de propagation de type microruban pour lesquelles le rôle du substrat est joué par le matériau à expertiser. Ici, on s'intéresse aux ruptures de fibre et au délaminage. Le principe de la détection est le suivant :

- d'abord, on mesure Γ à différents instants choisis pour lesquels une sollicitation mécanique a été susceptible de créer un endommagement ;
- ensuite, en prenant un état vierge d'endommagement comme référence, on compare les mesures à ces instants avec les mesures faites pour l'état de référence.

Le diagnostic de détection de l'endommagement repose alors sur le postulat suivant : en l'absence de tout phénomène dissipatif autre que l'endommagement que l'on souhaite détecter, en supposant que les caractéristiques géométriques des différents éléments de la ligne de propagation ainsi que les propriétés physiques du matériau constitutif du plan de masse et du ruban sont constantes, si l'on relève des variations entre les valeurs de Γ et f_c mesurées à un instant donné et celles mesurées pour l'état de référence, alors ces variations seront imputées à des variations des propriétés diélectriques du matériau-substrat, révélatrices de l'endommagement au sein de ce matériau. Plus précisément, ces variations seront le reflet du fait que la permittivité diélectrique ϵ_r a été modifiée par l'endommagement et donc que le matériau est effectivement endommagé.

Pour cela, on se place sous l'Hypothèse des Petites Perturbations qui justifie le fait que les variations de dimensions du ruban sont suffisamment petites pour qu'elles ne modifient pas les caractéristiques du circuit, et on estime qu'aucun autre phénomène dissipatif notable, susceptible de modifier les propriétés diélectriques et mécaniques du milieu analysé, autre que l'endommagement à détecter, n'est présent. Ces hypothèses sont évidemment mises en défaut au voisinage de l'état de ruine du matériau.

Pour l'heure, l'objectif n'est pas de quantifier la dépendance de ϵ_r vis-à-vis de l'endommagement. Il s'agit uniquement de voir si les variations de mesure sur les grandeurs Γ et f_c , entre celles faites à un instant donné et celles l'état de référence, mises en évidence par cette méthode de détection, peuvent être corrélées à d'autres indicateurs de présence d'endommagement. Enfin, signalons que l'on a vérifié au préalable de toute autre mesure que la méthode est capable de détecter l'anisotropie du matériau [8] [7] [6] [9].

3 Description des essais réalisés et des mesures

La détection de ruptures de fibre a été réalisée :

- pour un composite verre/époxy sur une seule géométrie d'éprouvette dont la longueur (L), la largeur (l) et l'épaisseur (e) sont les suivantes : $L = 150$ mm, $l = 48.5$ mm et $e = 4.5$ mm ;
- pour un composite carbone/époxy à l'aide de 3 géométries d'éprouvette différentes par leur épaisseur : $L = 150$ mm, $l = 20$ mm et $e = 3, 6, 8$ mm.

Le test utilisé pour détecter les ruptures de fibres est un essai de flexion 3 points réalisé sur une éprouvette unidirectionnelle à 0° . Il permet de contrôler l'apparition et l'évolution du phénomène. En exploitant la courbe force/flèche, la rupture de pente est révélatrice de l'initiation et de l'évolution de cet endommagement. Cette grandeur sera corrélée aux mesures faites par la méthode de détection par microondes. L'essai de flexion est piloté en déplacement. Le profil de déplacement du couteau en fonction du temps est de type charge/décharge en "dent-de-scie". Afin de ne pas superposer dans la variation éventuelle de Γ et f_c , la variation due à l'endommagement et celle due à l'existence d'un champ de contrainte au sein du matériau, les mesures sont réalisées aux retours à charge nulle. La longueur entre les appuis est de 100 mm. L'instrumentation d'une éprouvette, nécessaire pour les mesures microondes, est réalisée par un film de cuivre qui recouvre entièrement l'une de ses faces et par un ruban de cuivre placé perpendiculairement à l'axe longitudinal de l'éprouvette (Fig. 7).

La détection du délaminage a été réalisée uniquement sur certaines des éprouvettes du composite carbone/époxy. Plus précisément, sur les éprouvettes les plus épaisses (6 et 8 mm), les essais de flexion 3 points provoquent par cisaillement intralaminare anti-plan l'apparition d'une macrofissure qui coupe l'éprouvette dans le sens de son plan moyen approximativement à mi-épaisseur (Fig. 7(a)). Ce phénomène se produit de manière très brutale et définit la ruine de l'éprouvette. C'est ce phénomène que nous qualifions délaminage dès lors que la macrofissure a été refermée (Fig. 7(b, c)). Il est ainsi exactement le même par exemple, que celui qui apparaît en fatigue dans le plan médian d'un stratifié ($0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ$)_s. Ainsi, après avoir conduit les essais et les mesures pour la détection des ruptures de fibre jusqu'à l'apparition de cette macrofissure, on referme ses lèvres et on ré-instrumente cette "nouvelle" éprouvette comme dans son état de initial. On procède alors à une unique mesure microonde de cet état délaminé que l'on va comparer avec celle faite pour l'état de référence, défini comme étant celui initial après la première instrumentation. Ainsi, contrairement au cas des ruptures de fibre, où l'on suit l'évolution du phénomène de son initiation à sa fin, pour le délaminage, on ne compare qu'un

seul état avec l'état de référence : celui qui correspond à l'éprouvette pour laquelle la macrofissure créée a été refermée et ré-instrumentée. Dans le cas du délaminage, c'est l'expertise visuelle qui fait office de garantie de l'existence du délaminage.

Dans tous les cas, la grandeur mesurée par la méthode de détection est le coefficient Γ . C'est un nombre complexe. Les analyses des mesures se font au travers de la partie réelle, imaginaire et de l'amplitude de cette grandeur. Pour comparaison à un état de référence, on utilise également la partie réelle, imaginaire et l'amplitude du coefficient $\frac{\Gamma-\Gamma_{REF}}{\Gamma_{REF}}$, où Γ_{REF} désigne le coefficient Γ de l'état choisi comme référence. Pour la détection des ruptures de fibre, cet état est celui de l'éprouvette de flexion 3 points à l'instant du retour à un déplacement nul après le premier déplacement (donc le plus faible) maximum appliqué. Pour la détection du délaminage, il est l'état après la première instrumentation de l'éprouvette.

4 Résultats

4.1 Détection des ruptures de fibre dans le composite verre/époxy

A partir de l'analyse des mesures, on constate que la partie imaginaire du coefficient $\frac{\Gamma-\Gamma_{REF}}{\Gamma_{REF}}$ montre des variations notables à partir d'un déplacement du couteau voisin de 4.5 mm (Fig. 3). Ce déplacement est en outre repéré expérimentalement comme étant celui qui indique significativement le début de l'apparition des ruptures de fibres. En effet, on observe pour cette valeur une rupture significative de la pente de la courbe force/déplacement (Fig. 2).

4.2 Détection des ruptures de fibre dans le composite carbone/époxy

Pour les éprouvettes de 3 mm, à partir de l'analyse des mesures, on constate que les variations de pente de la courbe force/déplacement se corrént avec les variations du coefficient $\frac{\Gamma-\Gamma_{REF}}{\Gamma_{REF}}$, aussi bien pour les parties réelle et imaginaire que pour l'amplitude (Fig. 4). En fait, il a été facile de d'analyser les mesures sur ces éprouvettes car la fréquence de résonance constatée pour l'état vierge d'endommagement ne varie pas significativement au cours de l'essai. Pour les éprouvettes de 6 et 8 mm, les variations de pente de la courbe force/déplacement se corrént aussi avec les variations du coefficient $\frac{\Gamma-\Gamma_{REF}}{\Gamma_{REF}}$. Néanmoins, la fréquence de résonance évoluant également, il est plus difficile de présenter des résultats sous une forme similaire à ceux des éprouvettes de 3 mm. On ne présente donc que les variations du coefficient $\frac{\Gamma-\Gamma_{REF}}{\Gamma_{REF}}$ (Figs. 8 et 9).

4.3 Détection du délaminage dans le composite carbone/époxy

Pour les deux types d'éprouvettes (épaisseur 6 mm et 8 mm), on constate une modification significative entre la mesure faite pour l'état de référence et celle faite après refermeture des macrofissures et ré-instrumentation des éprouvettes (Figs. 5 et 6). Pour ces éprouvettes, le délaminage est donc bien détecté.

5 Conclusion

En conclusion, on peut affirmer que la méthode détecte aussi bien les ruptures de fibres que le délaminage. Toutefois, aucun travail n'a été réalisé pour l'heure afin de voir comment les mesures devaient être interprétées pour en extraire non seulement la signature des endommagements mais aussi leur densité.

Références

- [1] B. Akuthota, D. Hughes, R. Zoughi, J. Myers, and A. Nanni. Near field microwave detection of disbond in carbon fiber reinforced polymer composites used for strengthening cement-based structures and disbond repair verification. *Journal of materials in civil engineering*, 16 :540–546, 2004.
- [2] S. I. Ganchev, R. J. Runser, N. Qaddoumi, E. Ranu, and G. Carriveau. Microwave nondestructive evaluation of thick sandwich composites. *Materials evaluation*, 53 :463–467, 1995.
- [3] C. Huber and R. Zoughi. Detecting stress and fatigue cracks. *IEEE potentials*, 15 :20–24, 1996.
- [4] D. Hughes, C. Behrens, R. Zoughi, G. Green, and P. Campbell. Microwave and millimeter wave inspection of impact in gfrp composite and pitted corrosion in steel. In *ASNT Spring Conference*, Portland, OR., USA, March 2002.

- [5] J. H. LeGallou, M. Ledieu, J. C. Prigent, and O. Archer. New technique for microwave characterization of material under compressive stress. In *Conference on Precision Electromagnetic measurement*, pages 16–17, Ottawa, Canada, June 2002.
- [6] J. Rossignol and A. Thionnet. Détection de ruptures de fibres au sein d'un composite unidirectionnel à l'aide d'un circuit micro-onde résonant. *Matériaux 2006*, Dijon, France, 13-17 novembre :papier 0014, 2006.
- [7] J. Rossignol and A. Thionnet. Détection d'endommagement dans les composites fibres/résine à l'aide de la technologie micro-onde. *Revue des composites et des matériaux avancés*, vol. 16, n°3 :263–278, 2006.
- [8] J. Rossignol and A. Thionnet. Une nouvelle technique de détection des endommagement dans les composites basée sur l'utilisation des micro-ondes et des circuits microrubans résonants. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris (Mécanique)*, 334 :719–724, 2006.
- [9] J. Rossignol and A. Thionnet. Détection d'endommagement dans les composites fibres/résine à l'aide de la technologie micro-onde. *JNC15*, Marseille, France, 6-8 juin, 2007.

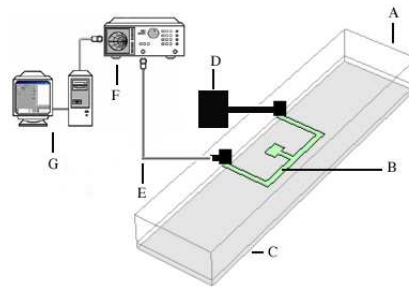


FIG. 1 – Schéma de principe d'un circuit microruban (A : substrat, B : ruban, C : plan de masse, D : charge Z_{charge} , E : câble coaxial, F : analyseur de réseaux, G : système d'acquisition des mesures).

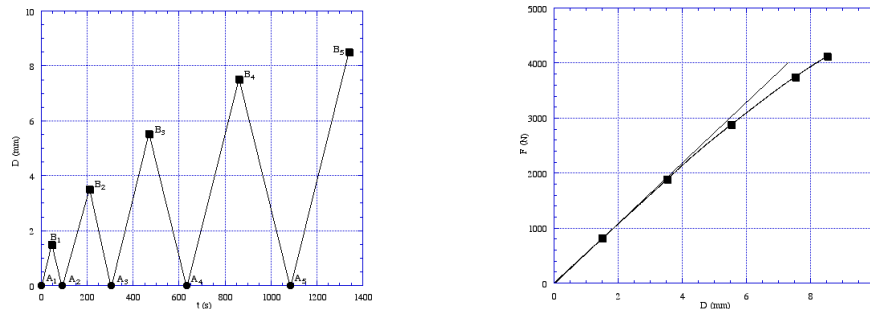


FIG. 2 – Déplacement type appliqué (D, unité : mm) en fonction du temps (t, unité : s) et courbe force maximale mesurée (F, unité : N) en fonction du déplacement maximum atteint (D, unité : mm) aux points $(B_i)_{i=1,\dots,5}$.

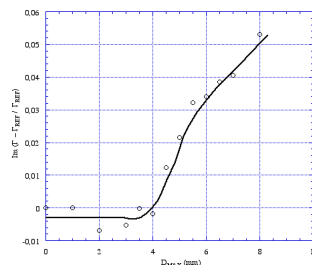
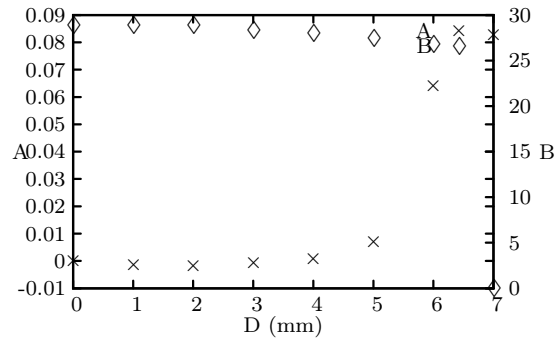
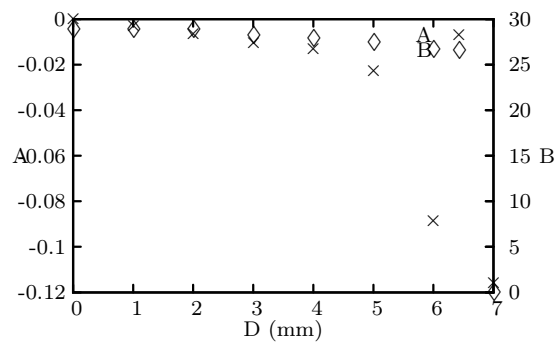


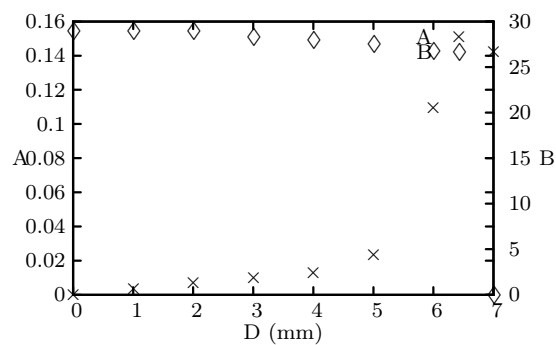
FIG. 3 – Détection des ruptures de fibre dans le composite verre/époxy. Partie imaginaire du coefficient $\frac{\Gamma - \Gamma_{REF}}{\Gamma_{REF}}$ (sans unité) en fonction du déplacement maximum atteint (D_{MAX} , unité : mm) (Issues de mesures aux points $(A_i)_{i=1,\dots,5}$) (Fig. 2)).



(a)

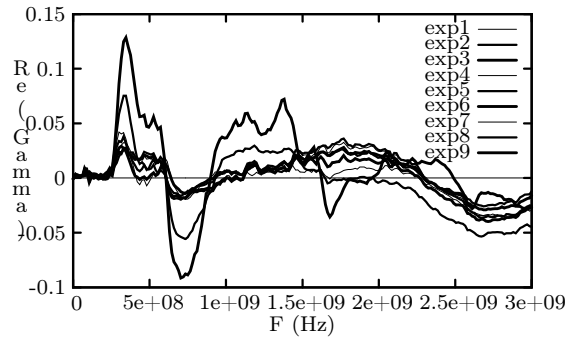


(b)

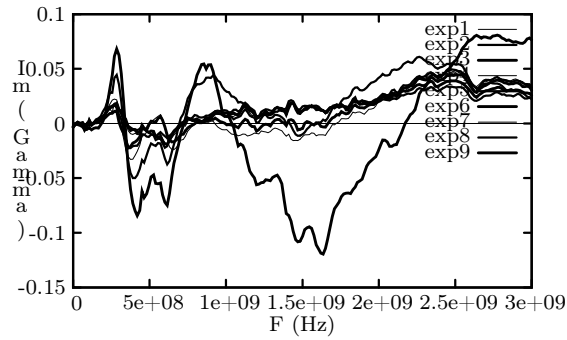


(c)

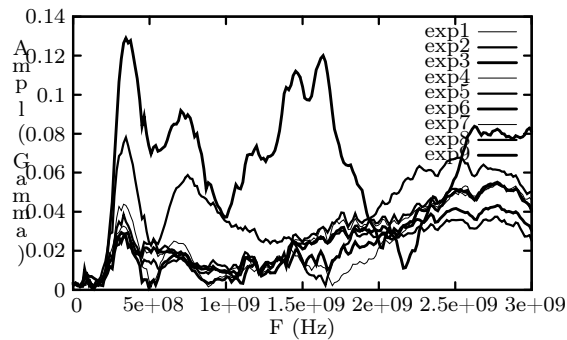
FIG. 4 – Détection des ruptures de fibre dans le composite carbone/époxy. Epreuve de 3 mm d'épaisseur. Corrélation entre la perte de pente (B) de la courbe de flexion en fonction de la flèche de flexion maximale atteinte (D , unité : mm) et $\frac{\Gamma - \Gamma_R}{\Gamma_R}$ (A) en fonction de la flèche de flexion maximale atteinte mesuré aux retours à un déplacement nul. Mesure à la fréquence de résonance 570 MHz. (a) Partie réelle. (b) Partie imaginaire. (c) Amplitude.



(a)

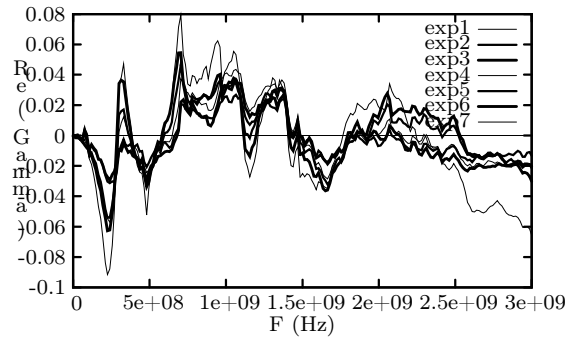


(b)

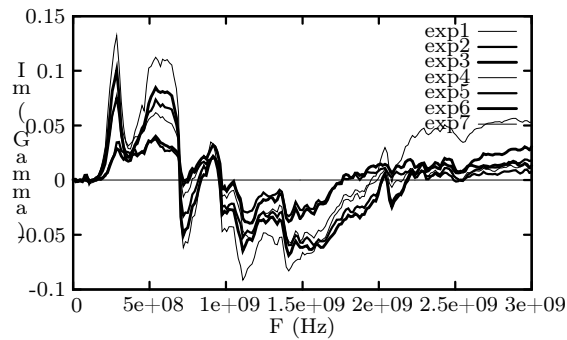


(c)

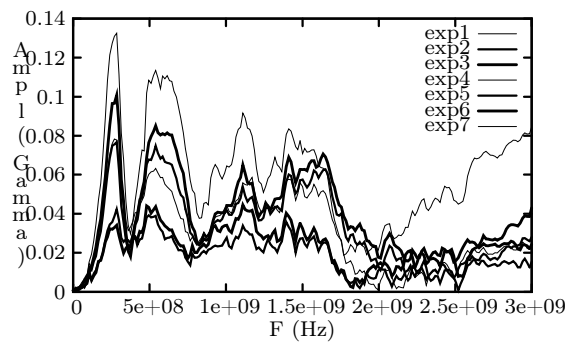
FIG. 5 – Détection des ruptures de fibre dans le composite carbone/époxy. Eproutette de 6 mm d'épaisseur. $\frac{\Gamma - \Gamma_R}{\Gamma_R}$ (sans unité) en fonction de la fréquence (F , unité : Hz) aux retours à un déplacement nul. (exp i : mesure après un déplacement maximum atteint de $i/2$ mm). (a) Partie réelle. (b) Partie imaginaire. (c) Amplitude.



(a)



(b)



(c)

FIG. 6 – Détection des ruptures de fibre dans le composite carbone/époxy. Eproutette de 8 mm d'épaisseur. $\frac{\Gamma - \Gamma_R}{\Gamma_R}$ (sans unité) en fonction de la fréquence (F , unité : Hz) aux retours à un déplacement nul. (expi : mesure après un déplacement maximum atteint de $i/2$ mm). (a) Partie réelle. (b) Partie imaginaire. (c) Amplitude.

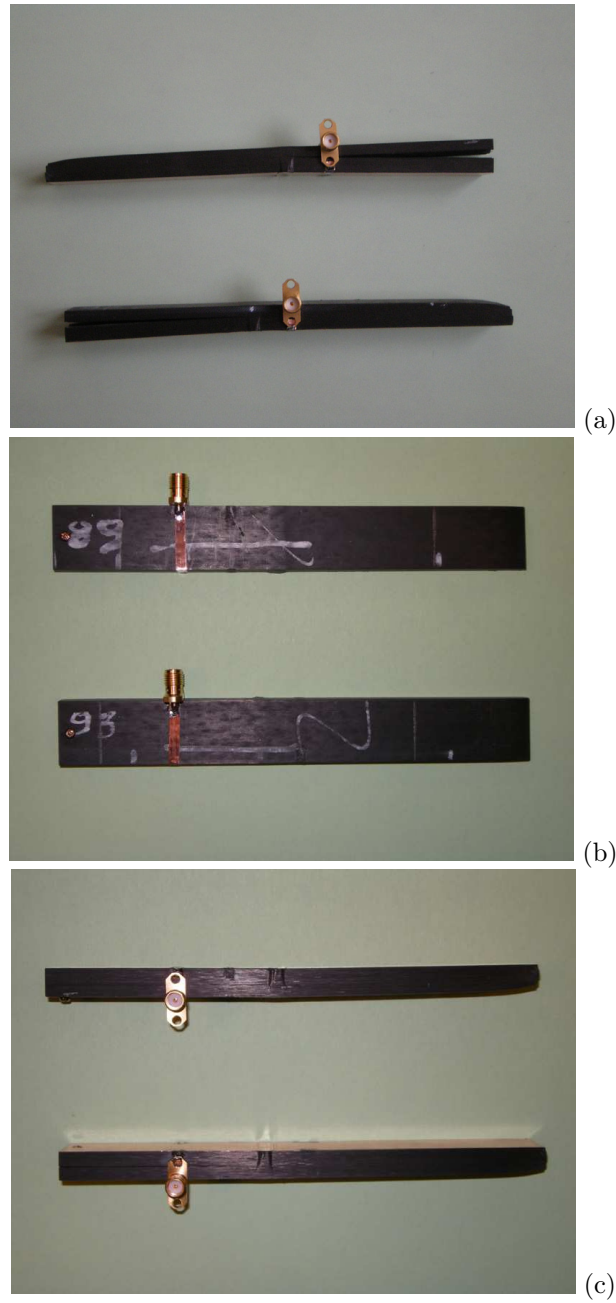
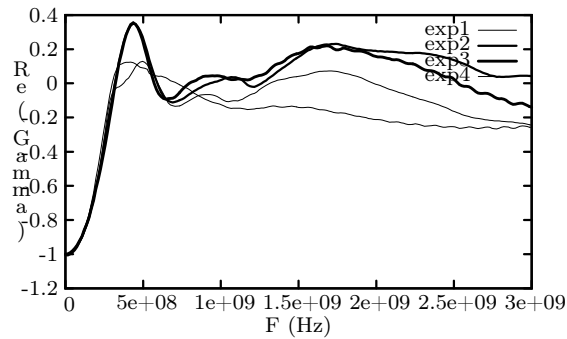
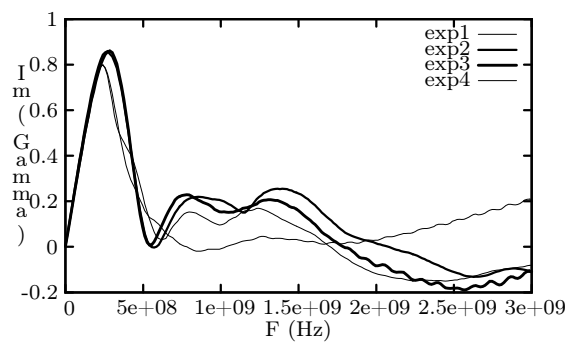


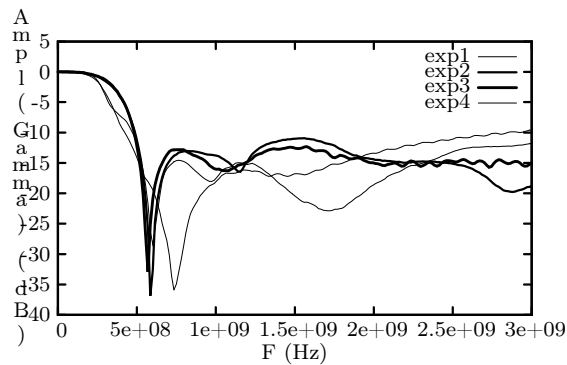
FIG. 7 – Détection du délaminage dans le composite carbone/époxy. Eprouvettes de 8 mm d'épaisseur. (a) Après rupture et apparition de la macrofissure. (b) (c) Après refermeture de la macrofissure et ré-instrumentation pour la détection du délaminage.



(a)

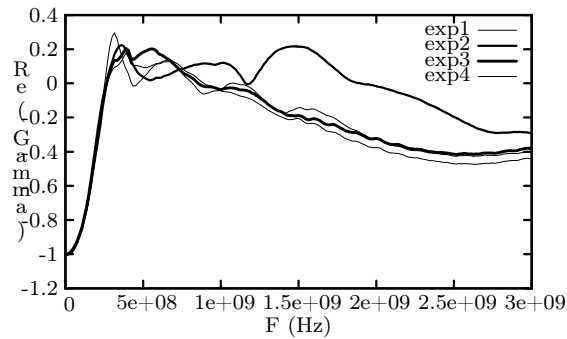


(b)

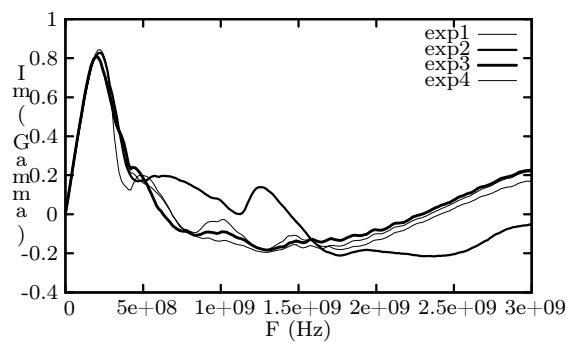


(c)

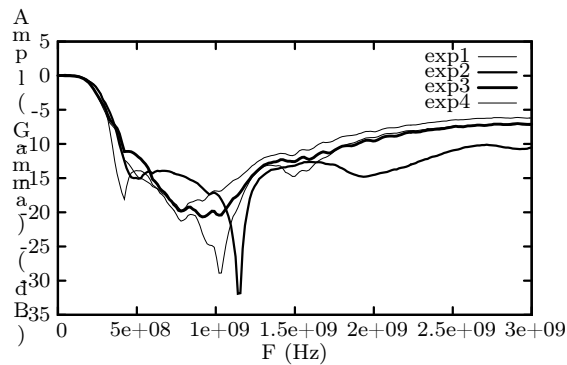
FIG. 8 – Détection du délaminage dans le composite carbone/époxy. Eproutettes réinstrumentées de 6 mm d'épaisseur. Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence (F , unité : Hz). (a) Partie réelle. (b) Partie imaginaire. (c) Amplitude (dB). exp1 : mesure éprouvette n°65 après instrumentation avant essai, exp2 : mesure éprouvette n°65 rompue après ré-instrumentation, exp3 : mesure éprouvette n°66 rompue après ré-instrumentation, exp4 : mesure éprouvette n°67 rompue après ré-instrumentation.



(a)



(b)



(c)

FIG. 9 – Détection du délaminage dans le composite carbone/époxy. Eproutettes réinstrumentées de 8 mm d'épaisseur. Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence (F , unité : Hz). (a) Partie réelle. (b) Partie imaginaire. (c) Amplitude (dB). exp1 : mesure éprouvette n°89 après instrumentation avant essai, exp2 : mesure éprouvette n°89 rompue après ré-instrumentation, exp3 : mesure éprouvette n°86 rompue après ré-instrumentation, exp4 : mesure éprouvette n°87 rompue après ré-instrumentation.