

Détection d'endommagement dans les composites à l'aide d'une technologie utilisant des micro-ondes et par thermographie infrarouge

J.Rossignol^{a,d}, M.L.Pastor^b, A.Thionnet^{c,d}

a - Institut Carnot de Bourgogne, CNRS UMR 5209

b - Institut Clément Ader / IUT de Tarbes - 1, rue Lautréamont - BP 1624 - 65016 Tarbes

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

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

*e-mail : jerome.rossignol@u-bourgogne.fr, marie.laetitia.pastor@iut-tarbes.fr, alain.thionnet@enscm.fr,
alain.thionnet@u-bourgogne.fr*

RESUME

On présente dans cette étude deux méthodes de détection d'endommagement dans les composites : une basée sur la technologie des structures propagatives électromagnétiques dans la gamme des micro-ondes et l'autre basée sur la mesure de champs thermiques dans la gamme des infrarouges. Toutes deux sont appliquées à la détection des ruptures de fibres et du délaminage dans des composites fibres/résine de type verre/époxy et carbone/époxy.

La méthode par micro-onde est fondée sur les modifications des propriétés diélectriques d'un milieu lors d'un endommagement. Elle analyse les modifications de l'onde réfléchie d'une onde transmise dans le matériau vue comme une structure propagative et dont les propriétés se dégradent par la présence d'endommagement. La méthode par thermographie infrarouge repose sur les modifications des propriétés thermiques d'un milieu lors d'un endommagement. La propagation des ondes thermiques transmises dans le matériau est analysée. Lorsque ces ondes rencontrent un défaut, elles sont perturbées et la différence de température entre les différents milieux est alors mesurée.

Des essais de flexion 3 points provoquant des endommagements (ruptures de fibre et délaminage) ont été menés. Pour conclure sur la pertinence de la détection, on corrèle les mesures électromagnétiques avec la perte de rupture de pente de la courbe force/flèche et avec la détection par thermographie infrarouge.

MOTS-CLES : CND, caractérisation diélectrique, micro-ondes, thermographie infrarouge, détection d'endommagement, composites.

1 But de l'étude

Cette étude propose de détecter, par deux méthodes distinctes, les principaux endommagements au sein des composites unidirectionnels et/ou stratifiés d'unidirectionnels : ruptures de fibres et délaminage. Les matériaux considérés sont soit de type carbone/résine, soit de type verre/résine. Les endommagements ont été créés par des essais de flexion 3 points sur des éprouvettes d'unidirectionnels à 0° dimensionnées de telle sorte que pour certaines, seul le phénomène de rupture de fibre soit présent et que pour d'autres, le cisaillement hors plan provoque en plus ce que l'on peut assimiler à du délaminage.

La première méthode de détection envisagée voit la structure à expertiser comme faisant partie du moyen de mesure : elle joue le rôle du substrat d'une ligne de propagation électromagnétique dans la gamme des micro-ondes. La présence d'endommagement est alors révélée par le fait que la modification des propriétés de ce substrat par de l'endommagement modifie les caractéristiques de la ligne et donc, modifie les ondes transmises et réfléchies.

La seconde méthode envisagée utilise une source de chaleur externe (lampe halogène) qui transmet un flux thermique au matériau. La mesure des ondes infrarouges réfléchies par le matériau permet d'obtenir la température en surface de ce dernier. La présence d'un dommage crée un milieu hétérogène et est alors révélé par une modification du champ de température de la structure.

2 La méthode de détection utilisant la technologie 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 cm^2) de métal sous la forme d'un motif conducteur : c'est le ruban. La forme du motif, aux gammes de fréquences utilisées, confère au circuit 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.

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 faites sur 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 [1] [2] [3] [4].

3 La méthode de détection utilisant la thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est une méthode optique sans contact et en temps réel. Elle peut être utilisée pour faire du suivi d'endommagement lors d'essais mécaniques mais également en contrôle non destructif. Dans ce cas, la thermographie infrarouge est basée sur l'application d'une sollicitation thermique à l'échantillon via une source de chaleur (lampes halogènes) [5]. Les ondes émises se propagent à l'intérieur de l'éprouvette et sont

réfléchies en atteignant les bords libres de l'éprouvette. La présence d'un défaut crée un milieu hétérogène et modifie son indice. Lorsque les ondes rencontrent ce milieu, elles sont perturbées et un gradient de température est alors généré dans le matériau. En effet, les deux milieux ont une conductivité thermique différente et donc une émissivité différente qui est captée par le capteur infrarouge de la caméra. Ce dernier permet alors de convertir l'émissivité en température. La différence de température entre les différents milieux est mesurée. Une cartographie bidimensionnelle du champ thermique est créée et les inhomogénéités sont alors détectées [6][7][8][9]. Cette méthode permet la détection d'inclusions, de délaminage, de décohésions et de fissurations [10]. Les composites sont bien adaptés à la thermographie infrarouge car ils possèdent une diffusion thermique moyenne et un échange d'énergie thermique faible avec l'extérieur ce qui permet de générer un signal infrarouge assez fort.

4 Description des essais réalisés et des mesures

4.1 Les essais

La détection des ruptures de fibres a été réalisée :

- pour un composite verre/époxy sur une seule géométrie d'éprouvette de type plaque mince ;
- pour un composite carbone/époxy à l'aide de 3 géométries d'éprouvette différentes par leur épaisseur : 3, 6 et 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. 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" (Fig. 2).

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 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 de 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 $(0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ)_s$.

4.2 Les mesures par la technologie utilisant des micro-ondes

La grandeur mesurée par la méthode de détection utilisant les micro-ondes 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.

Afin de ne pas superposer dans la variation éventuelle de Γ , 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. 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).

Pour la détection des ruptures de fibre, l'état de référence 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. En plus du coefficient Γ susceptible de révéler les ruptures de fibres, la rupture de pente de la courbe force/flèche, révélatrice de l'initiation et de l'évolution de cet endommagement, sera corrélée aux mesures faites par la méthode de détection par microondes.

Concernant le délaminage, après avoir conduit les essais et les mesures pour la détection des ruptures de fibres jusqu'à l'apparition de la macrofissure, on referme ses lèvres et on ré-instrumente cette "nouvelle" éprouvette comme dans son état 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 fibres 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.

4.3 Les mesures par la technologie utilisant la thermographie infrarouge

Les mesures thermiques sont réalisées à une fréquence de 50 Hz avec une caméra infrarouge Flir Titanium. La caméra dispose d'un plan focal de 320×240 pixels. Sa résolution thermique vaut environ 20 mK pour une gamme de température de 5 à 40 °C. Les détecteurs infrarouges de la caméra ont une gamme de longueur d'onde de 3,5 à 5 μm . Le temps d'intégration utilisé est de 950 μs .

La caméra est placée en face de l'éprouvette à une distance de 80 cm. L'éprouvette est sollicitée thermiquement grâce à une ou deux lampe(s) halogène(s) distante(s) de 60 cm par rapport à cette dernière (Fig. 10). Deux configurations ont été mises en place (Fig. 10) :

- dans le premier cas, le dispositif permet une mesure en transmission c'est-à-dire que la face de l'éprouvette observée par la caméra infrarouge est opposée à la face éclairée par la lampe halogène. La caméra et l'éclairage se font donc face ;
- dans le second cas, le dispositif permet une mesure en réflexion c'est-à-dire que la face de l'éprouvette observée par la caméra IR est la même que la face éclairée par la lampe halogène. La caméra IR et l'éclairage sont donc du même côté de l'échantillon.

Il est souvent préférable de mettre en place le second dispositif car il est le plus utilisé industriellement. En effet, le contrôle non destructif est très souvent réalisé in-situ sans démontage des pièces industrielles.

Les deux dispositifs expérimentaux permettent généralement de mettre en évidence des endommagements différents. Dans les deux cas, la lampe transmet un flux thermique durant 10 s. Un film relevant le champ de température projeté à la surface de l'éprouvette est enregistré. Celui-ci dure 30 s de façon à enregistrer la montée de chaleur (10 s) et le début de la descente en température (20 s).

5 Résultats des mesures de la méthode utilisant la technologie des micro-ondes

5.1 Détection des ruptures de fibres dans le composite verre/époxy

A partir de l'analyse des mesures micro-ondes, 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 de flexion 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). La rupture des fibres est donc bien détectée.

5.2 Détection des ruptures de fibres dans le composite carbone/époxy

Pour les éprouvettes de 3 mm d'épaisseur, à partir de l'analyse des mesures micro-ondes, on constate que les variations de pente de la courbe force/déplacement se corrélaient 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 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 d'épaisseur, les variations de pente de la courbe force/déplacement se corrélaient 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) qui mettent en évidence que la rupture des fibres est bien détectée.

5.3 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.

6 Résultats des mesures de la méthode utilisant la thermographie infrarouge

6.1 Détection des ruptures de fibres dans le composite verre/époxy

Dans le cas des composites verre/époxy, la rupture des fibres est observée à la fois en réflexion et en transmission (Fig. 11). Sur l'éprouvette non endommagée, le champ de température est homogène dans toute l'éprouvette

ce qui n'est pas le cas pour les éprouvettes endommagées.

6.2 Détection des ruptures de fibres dans le composite carbone/époxy

La rupture de fibres a toujours été observée quelle que soit l'épaisseur de l'éprouvette par transmission. Pour les éprouvettes de 3 mm d'épaisseur, la rupture de fibres a été clairement mise en évidence (Fig. 12). Lors du refroidissement, il apparaît sur l'éprouvette une ligne horizontale. Cela signifie qu'il y a un changement de température au sein de l'éprouvette. L'origine de cela est le changement de conductivité thermique du matériau. Cela impose que le matériau présente un endommagement. A partir de cette cartographie, il est possible de déterminer la position du défaut. Ici le seul paramètre intéressant est de le positionner dans le sens longitudinal de l'éprouvette. Ici il se situe à environ 7,8 cm du haut de l'éprouvette. Pour les éprouvettes de 6 et 8 mm d'épaisseur, il est plus difficile de mettre en évidence les ruptures de fibres car ces éprouvettes présentent également du délaminage qui est bien plus important et donc plus visible que la rupture de fibres (Fig. 13).

6.3 Détection du délaminage dans le composite carbone/époxy

Le délaminage a toujours été observé par réflexion. Les éprouvettes de 3 mm d'épaisseur ne présentent pas de délaminage. Elles n'ont effectivement présenté aucune perturbation de température par réflexion lors des essais. Pour les éprouvettes de 6 et 8 mm, le délaminage a été clairement mis en évidence (Fig. 13). Le délaminage est visible sur le haut de l'éprouvette. La figure (Fig. 13) montre que la température évolue suivant une certaine courbure qui correspond sûrement à la courbure initiée par la flexion 3 points.

7 Conclusion

En conclusion, on peut affirmer que la méthode de détection utilisant la technologie micro-onde détecte aussi bien les ruptures de fibres que le délaminage. Toutefois, aucun travail n'a encore été réalisé afin de voir comment les mesures doivent être interprétées et analysées pour en extraire non seulement la signature des endommagements mais aussi leur densité. Afin de réaliser ce travail, une méthode susceptible de donner des indications sur la position mais aussi sur la densité de défaut est nécessaire. La thermographie infrarouge peut être cette technique. Elle a, en effet, prouvé qu'elle détecte, comme l'autre méthode, les endommagements existant au sein de toutes les éprouvettes.

Références

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] D. Meola, G.M. Carlomagno, M. DiFoggia, and O. Natale. Infrared thermography to detect residual ceramic in gas turbine blades. *Appl. Phys. A*, 91 :685–691, 2008.
- [6] M. Heller, J. Williams, S. Dunn, and R. Jones. Thermomechanical analysis of composite specimens. *Composites Structures*, 11 :309–324, 1989.
- [7] A. Chrysochoos. Infrared thermography : a potential tool for analysing the material behaviour. *Mécanique et Industries*, 3 :3–14, 2002.
- [8] M.L. Pastor, C. Pescay, and C. Garnier. Comparison of two nondestructive tests in carbon/epoxy composites. *ICCM 17*, 2009.
- [9] M.L. Pastor, X. Balandraud, M. Grédiac, and J. Robert. Applying infrared thermography to study the heating of 2024-t3 aluminium specimens under fatigue loading. *Infrared Physics and Technology*, 51 :505–515, 2008.
- [10] B. Hay, J. Filtz, and J. Batsale. Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash. *Techniques de l'ingénieur R 2 955 Traité mesures et contrôles*, 2000.

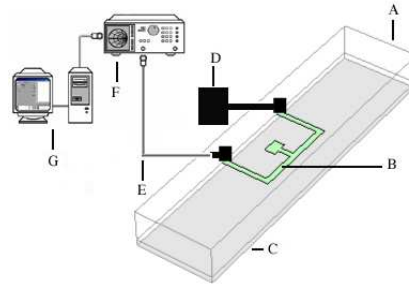


FIG. 1 – Schéma de principe d'un circuit microruban (A : substrat, B : ruban, C : plan de masse, D : charge ou mise en court-circuit, E : câble coaxial, F : analyseur de réseaux, G : système d'acquisition des mesures).

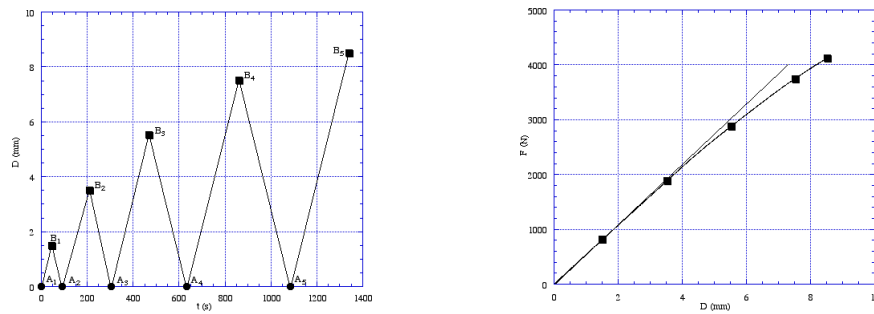


FIG. 2 – Déplacement type appliqué (D , unité : mm) en fonction du temps (t , unité : s) et courbe force maximale mesurée (F , unité : N) en fonction du déplacement maximum atteint (D , unité : mm) aux points $(B_i)_{i=1,\dots,5}$.

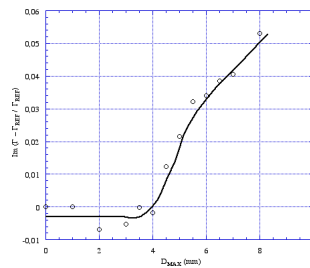


FIG. 3 – Détection des ruptures de fibres dans le composite verre/époxy. Partie imaginaire du coefficient $\frac{\Gamma - \Gamma_{REF}}{\Gamma_{REF}}$ (sans unité) en fonction du déplacement maximum atteint (D_{MAX} , unité : mm) (Issues de mesures aux points $(A_i)_{i=1,\dots,5}$ (Fig. 2)).

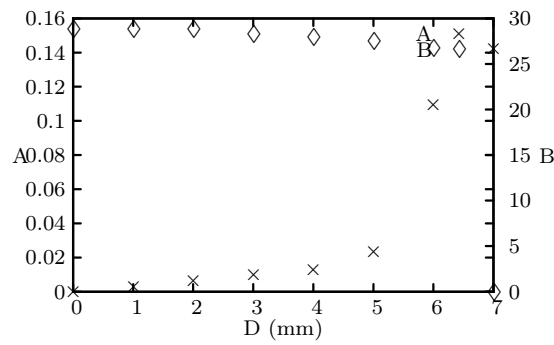


FIG. 4 – Détection des ruptures de fibres dans le composite carbone/époxy. Epreuve de 3 mm d'épaisseur. Corrélation entre la perte de pente (B) de la courbe de flexion en fonction de la flèche de flexion maximale atteinte (D , unité : mm) et l'amplitude de $\frac{\Gamma - \Gamma_R}{\Gamma_R}$ (A) en fonction de la flèche de flexion maximale mesurée aux retours à un déplacement nul. Mesures à la fréquence de résonance 570 MHz.

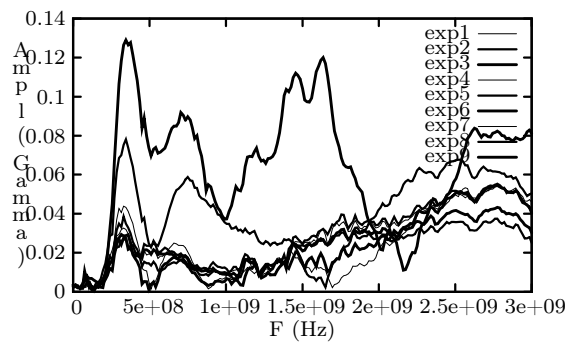


FIG. 5 – Détection des ruptures de fibres dans le composite carbone/époxy. Epreuve de 6 mm d'épaisseur. Amplitude de $\frac{\Gamma - \Gamma_R}{\Gamma_R}$ (sans unité) en fonction de la fréquence (F , unité : Hz) aux retours à un déplacement nul. (exp i : mesure après un déplacement maximum atteint de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

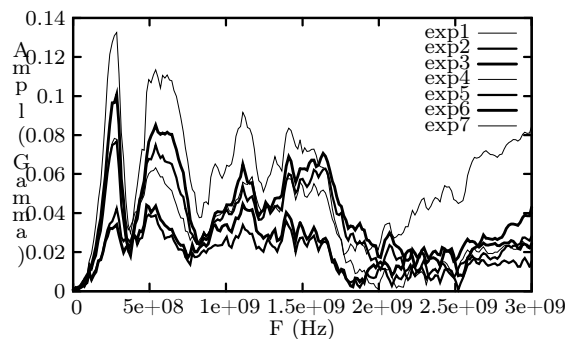


FIG. 6 – Détection des ruptures de fibres dans le composite carbone/époxy. Epreuve de 8 mm d'épaisseur. Amplitude de $\frac{\Gamma - \Gamma_R}{\Gamma_R}$ (sans unité) en fonction de la fréquence (F , unité : Hz) aux retours à un déplacement nul. (exp i : mesure après un déplacement maximum atteint de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

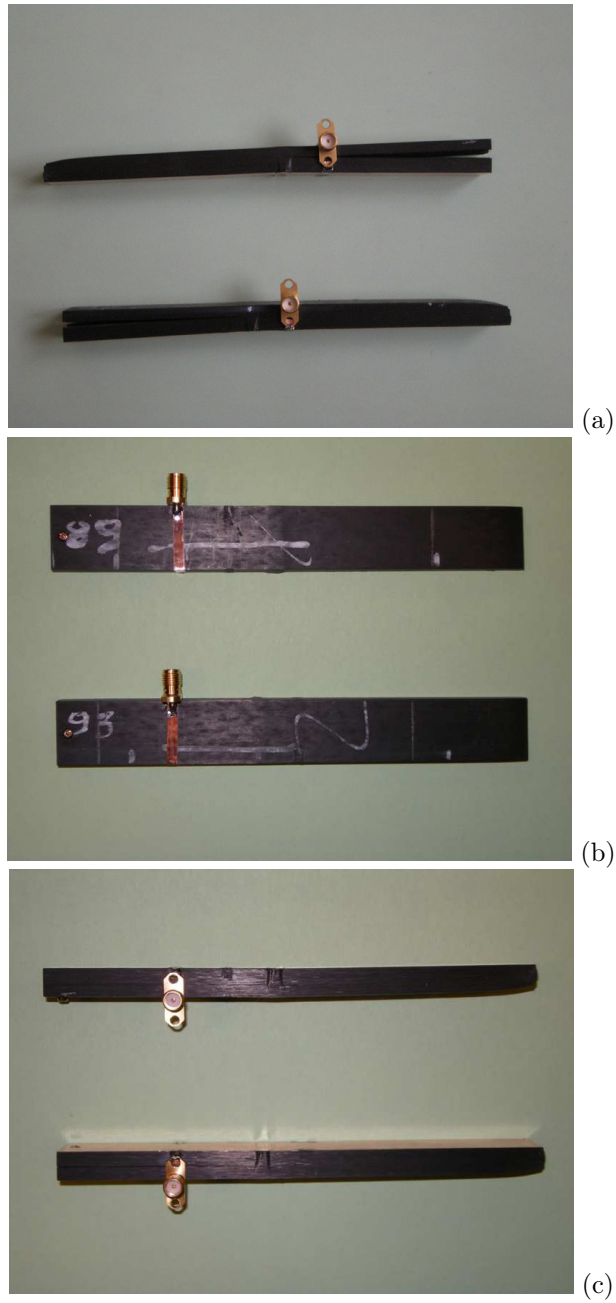


FIG. 7 – Détection du délaminage dans le composite carbone/époxy. Eprouvettes de 8 mm d'épaisseur. (a) Après rupture et apparition de la macrofissure. (b) (c) Après refermeture de la macrofissure et ré-instrumentation pour la détection du délaminage.

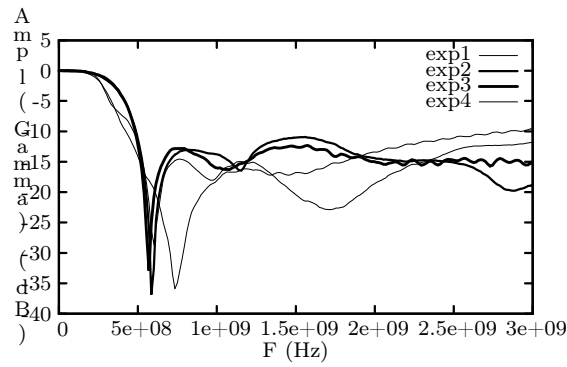


FIG. 8 – Détection du délaminage dans le composite carbone/époxy. Epreuve de 6 mm d'épaisseur réinstrumentée. Amplitude du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence (F , unité : Hz). exp1 : mesure sur l'éprouvette n°65 après instrumentation avant essai, exp2 : mesure sur l'éprouvette n°65 rompue après ré-instrumentation, exp3 : mesure sur l'éprouvette n°66 rompue après ré-instrumentation, exp4 : mesure sur l'éprouvette n°67 rompue après ré-instrumentation.

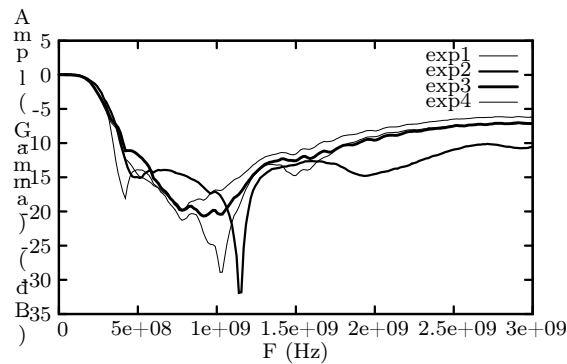
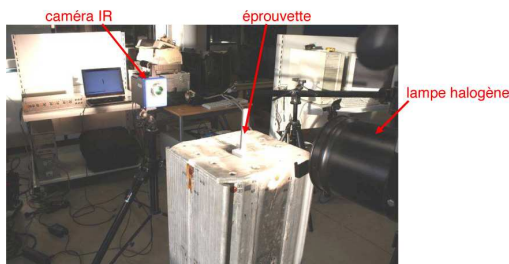
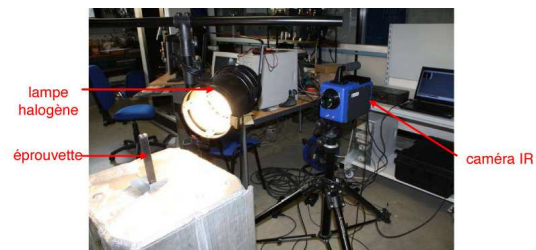


FIG. 9 – Détection du délaminage dans le composite carbone/époxy. Epreuve de 8 mm d'épaisseur réinstrumentée. Amplitude du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence (F , unité : Hz). exp1 : mesure sur l'éprouvette n°89 après instrumentation avant essai, exp2 : mesure sur l'éprouvette n°89 rompue après ré-instrumentation, exp3 : mesure sur l'éprouvette n°86 rompue après ré-instrumentation, exp4 : mesure sur l'éprouvette n°87 rompue après ré-instrumentation.



(a)



(b)

FIG. 10 – Dispositif expérimental de thermographie infrarouge. (a) Cas de la transmission. (b) Cas de la réflexion.

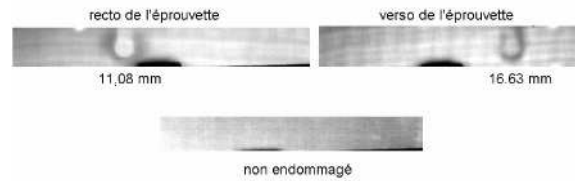


FIG. 11 – Observation par transmission en thermographie infrarouge des défauts sur les éprouvettes en verre/époxy.

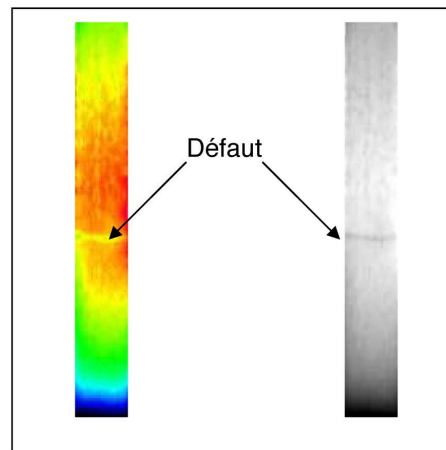


FIG. 12 – Cartes (couleur et noir et blanc) obtenues par thermographie infrarouge du champ de température sur les éprouvettes de 3 mm d'épaisseur en carbone/époxy.

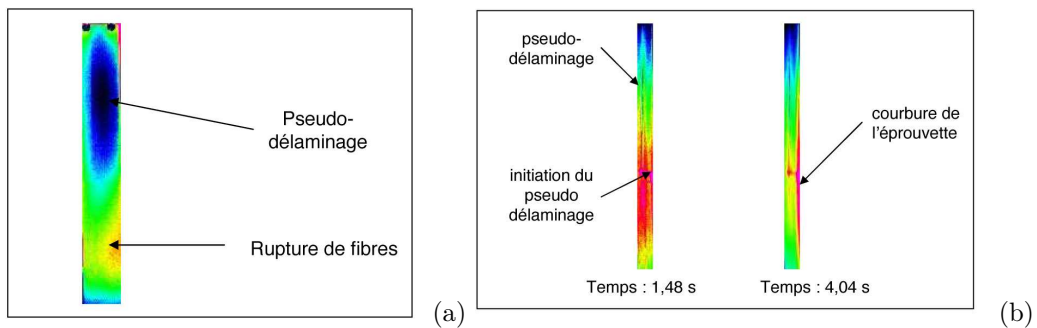


FIG. 13 – Carte obtenue par thermographie infrarouge du champ de température sur les éprouvettes de 6 et 8 mm d'épaisseur en carbone/époxy. (a) Vue du plan des éprouvettes (b) Vue de la tranche des éprouvettes.