

Une nouvelle technique de détection des endommagements dans les composites basée sur l'utilisation des micro-ondes et des circuits microrubans résonants

Jérôme Rossignol^{a,b}, Alain Thionnet^{a,c,*}

^a Université de Bourgogne, Mirande, département IEM, BP 47870, 21078 Dijon, France

^b Laboratoire de réactivité des solides, CNRS UMR 5613, 21078 Dijon, France

^c Centre des matériaux, Mines Paris, Paristech, CNRS UMR 7633, BP 87, 91003 Evry cedex, France

Reçu le 19 juin 2006 ; accepté le 4 octobre 2006

Disponible sur Internet le 1^{er} novembre 2006

Présenté par André Zaoui

Résumé

On présente dans cet article une méthode non destructive novatrice de détection d'endommagement dans les matériaux composites. Elle est fondée sur l'observation et l'analyse des modifications des propriétés diélectriques d'un milieu dues à un endommagement. Plus précisément, son originalité réside dans le fait que le diagnostic recherché est obtenu via un circuit résonant microbande soumis à un champ électromagnétique dans la gamme des micro-ondes. Dans cette Note, on montre la faisabilité de la méthode en examinant sa capacité à détecter les ruptures de fibres au sein d'une éprouvette en composite unidirectionnel soumise à un effort de flexion. **Pour citer cet article :** *J. Rossignol, A. Thionnet, C. R. Mecanique 334 (2006).*

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

A novel technique for microwave detection of damage in composite materials using a microstrip resonator. In this article, we present an innovative non-destructive method of detecting damage in composite materials. The method is based on the observation and analysis of the modifications in a material's dielectric properties that result from damage. The originality of this method comes from the fact that the diagnostic is obtained by using a microstrip resonator submitted to a microwave electromagnetic field. In this Note, the method's feasibility is demonstrated by the detection of fibre ruptures in a unidirectional composite submitted to flexural loading. **To cite this article :** *J. Rossignol, A. Thionnet, C. R. Mecanique 334 (2006).*

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Endommagement ; Composites ; CND ; Détection micro-onde

Keywords : Damage ; Composites ; CND ; Microwave detection

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : jerome.rossignol@u-bourgogne.fr (J. Rossignol), alain.thionnet@ensmp.fr (A. Thionnet).

Abridged English version

This Note proposes an innovative, non-destructive and in-situ method for detecting damage in composite materials that is based on the employment of a resonator microstrip that has been excited by microwaves. A microstrip resonator line that is constituted by a ground plan, a conductive ribbon and a substrate, according to certain hypotheses (TEM propagation), can be characterized by an impedance Z_c by a coefficient of reflexion Γ and, if it is resonant, by the frequency of its resonance f_c . For the purposes of this article, the material to be surveyed is used as substrate. Assuming that no dissipative phenomenon other than the damage that we wish to detect is present; that the geometrical characteristics of the microstrip are constant; that the physical properties of the materials used for the ground plan and ribbon are constant; and that variations in f_c and Γ appear; we can safely suppose that these variations can be explained by variations in the dielectric properties of the substrate resulting from the damage. Firstly, the feasibility of this method is tested by its ability to detect the anisotropy of a unidirectional material. For this, two microstrips are used: one whose ribbon is aligned with the fibre and one whose ribbon is aligned perpendicular to the fibre. A different coefficient of reflexion is measured in each circuit. The proposed method can therefore detect the material's anisotropy. Secondly, the feasibility of this method is tested by its ability to detect fibre breakings in a unidirectional specimen submitted to flexural loading. The applied displacement is of a load/unload type. All measurements of Γ are made during the moments of zero-displacement located between loading and unloading. These measurements show variations in Γ (Fig. 1) at the time corresponding to the appearance of a significant number of fibre breakings (Fig. 2, $D = 4.7$ mm). Also, in addition to the absence of load, no significant residual displacement is visible. We can thus conclude that the observed variations of Γ are solely due to fibre breakings. The method detects, therefore, the presence of this damage. The logical continuation of this study is to see if the method is able to localise and distinguish between different types of damage which can occur in the substrate.

1. Introduction

En particulier dans le domaine des transports (ferroviaires, automobiles, aéronautiques), l'accroissement et le renforcement des normes de sécurité conduisent à l'obligation d'un contrôle périodique accru des structures. Ce contrôle a notamment pour objectif d'en prévenir toute défaillance due à une perte de ses caractéristiques mécaniques induite par de l'endommagement. La littérature met en évidence de nombreuses méthodes possibles de contrôle non destructif de l'endommagement au sein des matériaux et des structures. Cependant, le cadre de nos exigences, dans lequel on inscrit les notions de coût, de rapidité d'une mesure réalisée obligatoirement in-situ (afin de réduire les coûts d'immobilisation) et d'adaptation aux composites, fait que le nombre des techniques envisageables est finalement assez réduit. Ainsi, les méthodes fondées sur le principe de la thermographie infrarouge, de l'émission acoustique, de la méthode EMIR (ElectroMagnetic InfraRed) et de l'imagerie micro-onde conduisent, en général, assez aisément à une expertise adaptée à notre demande. Egalement, deux grandes familles de méthodes utilisent des ondes électromagnétiques dans le domaine des micro-ondes [1–5]. La distinction entre elles deux réside dans le fait que l'une agit avec contact et l'autre sans contact. Les méthodes sans contact disposent de deux antennes, l'une émettrice l'autre réceptrice d'un champ électromagnétique micro-onde. Le milieu à expertiser est placé entre les deux antennes. Un champ électromagnétique est émis et traverse le milieu, puis l'onde transmise est récupérée et analysée par l'antenne émettrice. Les méthodes avec contact les plus fréquemment utilisées placent le milieu à expertiser soit à l'extrémité d'un guide d'onde, soit dans un câble coaxial dans lequel il joue alors le rôle de l'isolant. L'expertise du matériau est ensuite réalisée à l'aide d'un analyseur de réseau qui émet un champ électromagnétique micro-onde dans le guide ou dans le câble puis analyse les champs réfléchis et transmis. Dans les deux cas, ces techniques ne permettent pas aisément, voire pas du tout, la mise en place de l'expertise d'une structure volumineuse avec des formes complexes.

Si c'est l'infrastructure même des méthodes précédentes qui nous fait les abandonner, en revanche, la technique des micro-ondes est celle qui nous intéresse dès lors qu'elle est utilisée sous une autre forme. En effet, dans le domaine des télécommunications aux fréquences micro-ondes, les lignes de transmission (hors espace libre) sont généralement soit des guides d'ondes soit des circuits microrubans. Les caractéristiques de ces circuits sont influencées notamment par les propriétés diélectriques d'un de leurs éléments constitutifs, appelé le substrat. Le but de notre étude vise à proposer une technique novatrice de détection d'endommagement dans les composites, alternative et complémentaire des méthodes existantes et respectant nos exigences. Elle est construite sur l'idée suivante : la détection recherchée est obtenue via un circuit résonant microruban soumis à un champ électromagnétique dans la gamme des micro-ondes,

dont le rôle du substrat est tenu par le matériau dont on veut identifier l'état d'endommagement. En s'endommageant, les propriétés diélectriques du matériau-substrat vont se modifier. Par voie de conséquence, les valeurs des grandeurs caractéristiques du circuit vont également varier et seront donc révélatrices de l'état d'endommagement du matériau-substrat. Finalement, cette méthode observe et analyse les modifications des propriétés diélectriques d'un milieu dues à un endommagement. Dans cette Note, on montre la faisabilité de la méthode en montrant sa capacité à détecter l'anisotropie d'un composite unidirectionnel et la rupture des fibres d'une éprouvette en composite unidirectionnel soumise à un effort de flexion. En revanche, on ne répond pas pour l'instant ni à la question de savoir si la méthode proposée est capable de quantifier et de qualifier un endommagement, ni au calcul explicite des propriétés diélectriques d'un milieu équivalent à celui endommagé dont on ne donne que le principe.

2. Circuit microruban : principe, mesures et calculs des grandeurs caractéristiques

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 circuits microrubans.

Un circuit microruban 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 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, on peut définir pour la structure de propagation concernée une impédance dite caractéristique et notée Z_c . Dans le cas où le circuit est résonant, il est caractérisé par une fréquence de résonance, notée f_c , ainsi qu'un facteur de qualité Q . Pour aboutir au résultat que l'on souhaite, les grandeurs Z_c et Q ne sont pas pour l'heure les plus importantes : elles ne sont donc plus évoquées dans la suite.

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 (d'impédance Z_{coaxial}) à l'une des extrémités du ruban, l'autre extrémité du ruban étant reliée à une impédance Z_{charge} de valeur donnée et fixe, ici égale à Z_{coaxial} . 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. Il y mesure également l'onde réfléchie pour laquelle on associe, pour ce plan, un coefficient de réflexion complexe appelé usuellement S_{11} et noté ici Γ . L'examen des mesures du coefficient Γ en fonction de la fréquence permet d'identifier f_c .

Dans le cadre des hypothèses faites, qui permettent de simplifier le problème de la propagation de l'onde dans le circuit, il est possible de calculer Γ et f_c . Pour des géométries simples, des formules analytiques sont accessibles et basées sur le modèle de Hammerstadt [6]. Pour des géométries complexes, il faut avoir recours à des techniques numériques qui résolvent les équations de Maxwell.

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.

3. Principe de la méthode

Notre objectif est de détecter un endommagement au sein d'un matériau composite. Dans le cadre de la technique présentée, le rôle du substrat est joué par le matériau à expertiser et le diagnostic cherché est basé sur le postulat suivant : en l'absence de tout phénomène dissipatif excepté l'endommagement que l'on souhaite détecter, en supposant constantes les caractéristiques géométriques des différents éléments du circuit ainsi que les propriétés physiques du matériau constitutif du plan de masse et du ruban, si l'on relève des variations sur les valeurs de Γ et f_c , alors ces

variations seront imputées à des variations des propriétés diélectriques du matériau-substrat, révélatrices de l'endommagement au sein de ce matériau. 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, n'est présent. Ces hypothèses sont évidemment mises en défaut au voisinage de l'état de rupture. Dans le cadre de la méthode proposée, d'abord, on mesure Γ et f_c à différents instants choisis. Puis, pour chaque point de mesure, on en déduit ε_r , la permittivité relative du matériau-substrat équivalent à celui endommagé, en utilisant un modèle (analytique ou numérique) dans un processus inverse : on ajuste la valeur de ε_r jusqu'à ce que les valeurs calculées de Γ et f_c coïncident avec les valeurs mesurées.

4. Détection de l'anisotropie d'un composite unidirectionnel

Le premier test de mise en évidence de la faisabilité de la méthode consiste à détecter l'anisotropie d'un composite unidirectionnel vierge d'endommagement. Pour cela on utilise deux circuits microrubans résonants dont la géométrie et le substrat sont identiques. Leur différence repose sur la mise en place du ruban : pour l'un, il est aligné avec les fibres du composite (circuit « 0° »), pour l'autre, il est placé perpendiculairement (circuit « 90° »). On mesure un coefficient de réflexion différent entre les deux circuits et, par suite, on met en évidence une fréquence de résonance différente pour les deux circuits (Fig. 1). La méthode détecte donc bien l'anisotropie du milieu.

5. Détection des ruptures de fibres au sein d'un composite unidirectionnel en flexion

Le second test de mise en évidence de la faisabilité de la méthode consiste à détecter les ruptures de fibres au sein d'un composite unidirectionnel sollicité. Pour cela, un essai de flexion 3 points sur une éprouvette unidirectionnelle à 0° permet de contrôler l'apparition des ruptures de fibres et de détecter, en exploitant la courbe force/flèche, la rupture de pente révélatrice de l'initiation de cet endommagement. Un calcul par élément finis permet d'analyser et de confirmer l'essai et ses conclusions. Cette éprouvette est le substrat d'un circuit microruban résonant pour lequel, au cours de l'essai, on mesure Γ . Le ruban du circuit est collé sur la peau non sollicitée de l'éprouvette.

L'essai de flexion est piloté en déplacement. Le profil de déplacement du couteau en fonction du temps est de type charge/décharge (Fig. 2). Afin de ne pas superposer dans la mesure des variations éventuelles 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 lorsque l'éprouvette est non chargée (points $A_{i=1,5}$).

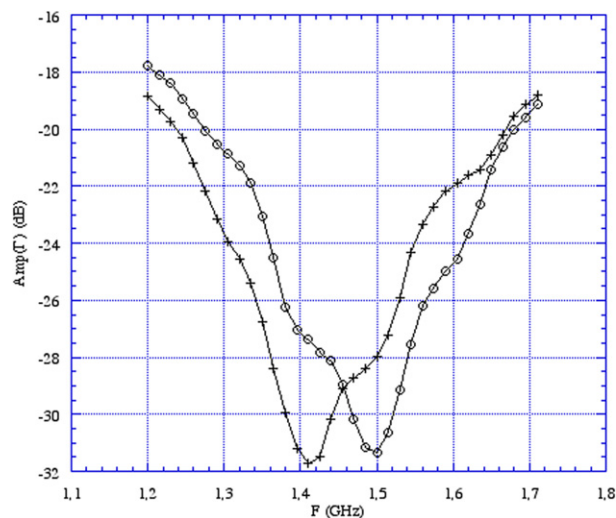


Fig. 1. Amplitude de Γ ($\text{Amp}(\Gamma)$, unité : dB) en fonction de la fréquence (F , unité : GHz).

Fig. 1. Amplitude of Γ ($\text{Amp}(\Gamma)$, unit: dB) versus frequency (F , unit: GHz). o: circuit " 0° ", +: circuit " 90° ".

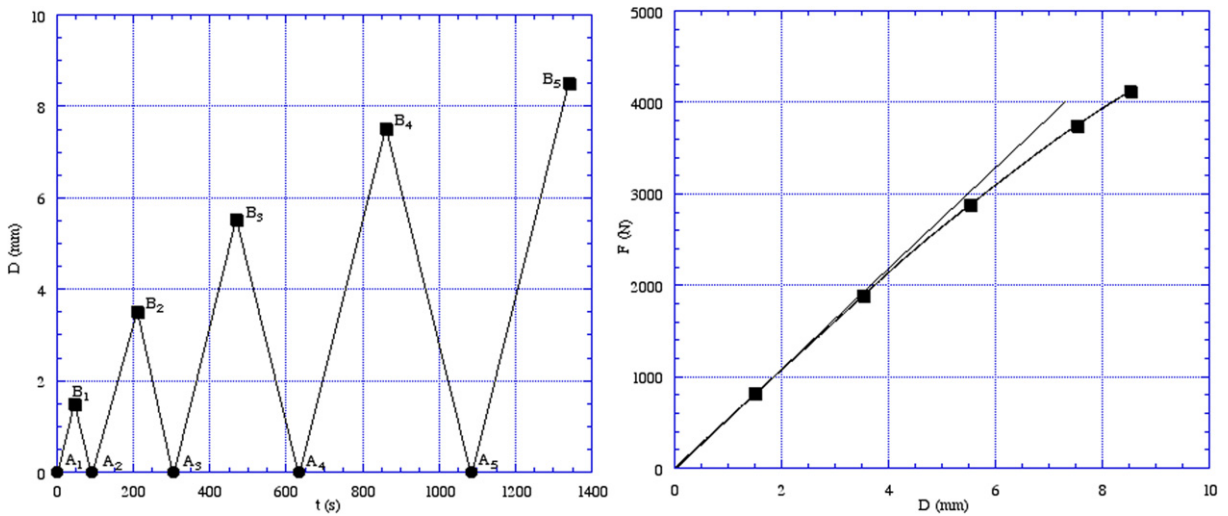


Fig. 2. Déplacement type appliqué (D , unité : mm) en fonction du temps (t , unité : s) et courbe force maximale mesurée (F , unité : N)/déplacement maximum atteint (D , unité : mm) aux points ($B_{i=1,5}$).

Fig. 2. Typical applied displacement (D , unit: mm) versus time (t , unit: s) and strength (F , unit: N) versus displacement (D , unit: mm) at the points ($B_{i=1,5}$).

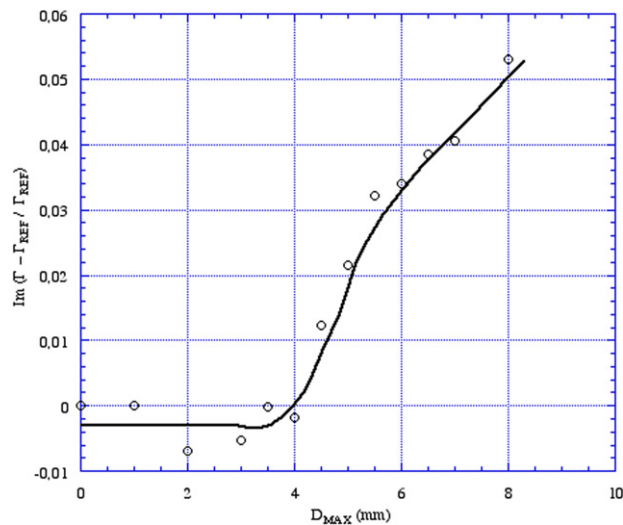


Fig. 3. Partie imaginaire du coefficient $\frac{\Gamma - \Gamma_{REF}}{\Gamma_{REF}}$ (sans unité) en fonction du déplacement maximum atteint (D_{MAX} , unité : mm) (issues de mesures aux points ($A_{i=1,5}$) (Fig. 2)).

Fig. 3. Imaginary part of the coefficient $\frac{\Gamma - \Gamma_{REF}}{\Gamma_{REF}}$ (unit: none) versus maximum displacement reached (D_{MAX} , unit: mm) (measurement at the points ($A_{i=1,5}$) (Fig. 2)).

Dans la littérature, les méthodes de caractérisation diélectrique des matériaux à faible perte établissent que la variation de la partie imaginaire de Γ est induite principalement par la variation de ϵ_r . Parmi l'ensemble des grandeurs mesurées analysables, on va donc s'intéresser au coefficient $\frac{\Gamma - \Gamma_{REF}}{\Gamma_{REF}}$ (Γ_{REF} désigne le coefficient Γ mesuré éprouvette non chargée à l'instant du retour à un déplacement nul après un déplacement maximum atteint de 1 mm). A partir de l'analyse des mesures, on constate que cette grandeur montre des variations notables à partir d'un déplacement du couteau de 4.7 mm (Fig. 3). Ce déplacement est en outre repéré expérimentalement (et par calcul par éléments finis) comme étant celui qui indique significativement le début de l'apparition des ruptures de fibres (Fig. 2). Également, en plus de l'absence de charge, aucun déplacement résiduel significatif n'est visible sauf après l'application

d'un déplacement maximum supérieur à 8 mm. Ainsi, en dessous de cette valeur, on peut affirmer qu'aucun autre phénomène dissipatif notable n'est présent au sein de l'éprouvette, autre que les ruptures de fibres. En conclusion, on peut affirmer que les variations de I' sont le reflet des variations de la permittivité relative du matériau-substrat dues à l'endommagement. La méthode est donc bien capable de détecter la présence de l'endommagement.

6. Conclusion

On a proposé et montré la faisabilité d'une méthode novatrice de détection d'endommagement dans les composites basée sur la technologie des micro-ondes et des circuits microrubans. Cette méthode observe et analyse les modifications des propriétés diélectriques d'un milieu dues à cet endommagement. Ces premiers résultats, encourageants, doivent maintenant être complétés, notamment en se posant la question de savoir si la méthode est capable de distinguer plusieurs endommagements en présence et de les quantifier, notamment dans l'épaisseur du matériau.

Références

- [1] D. Hughes, C. Behrens, R. Zoughi, G. Green, P. Campbell, Microwave and millimeter wave inspection of impact in GFRP composite and pitted corrosion in steel, *Journal of Materials in Civil Engineering* 16 (2004) 540–546.
- [2] B. Akuthota, D. Hughes, R. Zoughi, J. Myers, A. Nanni, Near field microwave detection of disbond in carbon fiber reinforced polymer composites used for strengthening cement-based structures and disbond repair verification, in: ASNT Spring Conference, Portland, OR, USA, March 2005.
- [3] S.I. Ganchev, R.J. Runser, N. Qaddoumi, E. Ranu, G. Cariveau, Microwave nondestructive evaluation of thick sandwich composites, *Materials Evaluation* 53 (1995) 463–467.
- [4] C. Huber, R. Zoughi, Detecting stress and fatigue cracks, *IEEE Potentials* 15 (1996) 20–24.
- [5] J.H. Le Gallou, M. Lédieu, J.C. Prigent, O. Archer, New technique for microwave characterization of material under compressive stress, in: Conference on Precision Electromagnetic measurement, Ottawa, Canada, June 2002.
- [6] E.O. Hammerstad, Equation for microstrip circuit design, in: Proceedings of the European Microwave Conference, Hamburg, Germany, 1972.