

Mesure de la concentration de défauts

Measurement of flow concentration



Jean-Pierre DUMOULIN

Université de Compiègne, Division Acoustique et Vibrations Industrielles,
BP n° 233, 60206 COMPIÈGNE CEDEX

J.-P. DUMOULIN né en 1956, obtient le diplôme d'Ingénieur en Génie Mécanique de l'Université de Compiègne spécialité acoustique et vibrations. Il effectue sa thèse de Docteur Ingénieur sur la détection et la reconnaissance de défauts dans les structures carbone-résine par méthode ultrasonore. Il est actuellement ingénieur de recherche et ses intérêts sont la reconnaissance de formes, le traitement du signal et la propagation dans les matériaux composites.



Noëlle MERCIER

Université de Compiègne, Division Acoustique et Vibrations, BP n° 233, 60206
COMPIÈGNE CEDEX

Noëlle MERCIER est Maître Assistant au Département de Génie Mécanique de l'Université de Compiègne. Elle a obtenu un Doctorat de 3^e Cycle à Paris-VI sur le contrôle non destructif de matériaux par ultrasons au cours de laquelle elle a en particulier mis au point une méthode permettant de classer des échantillons métalliques en fonction de leur granulométrie par la mesure de l'atténuation des ultrasons. Actuellement elle achève une thèse de Doctorat ès-Sciences Physiques sur la caractérisation de défauts par analyse spectrale du signal échographique et plus particulièrement par l'exploitation de la phase.



Jean-François DE BELLEVAL

Université de Compiègne, Division Acoustique et Vibrations, BP n° 233, 60206
COMPIÈGNE CEDEX

J.-F. de BELLEVAL est Professeur à l'Université de Compiègne et responsable de la Division Acoustique et Vibrations. Il est ancien élève de l'École Polytechnique et Docteur ès-Sciences Physiques. Il a consacré sa thèse à l'étude de l'émission infra-rouge locale d'un jet chaud et aux relations entre cette émission et le rayonnement acoustique du jet. La recherche actuelle est principalement orientée vers le Contrôle Non Destructif de matériaux par ultrasons, en particulier sur la modélisation, la caractérisation et la réalisation de transducteurs, l'imagerie ultrasonore et le traitement du signal.

RÉSUMÉ

Dans le cadre de la caractérisation de défauts (porosites-micro délaminage) dans les matériaux composites carbone-résine par méthode ultrasonore, nous exploitons l'amplitude des composantes spectrales du signal échographique et du signal de double transmission. La réponse d'un complexe carbone-résine à une excitation ultrasonore est une somme d'échos provenant de la réflexion sur les discontinuités du milieu de propagation. Le traitement par analyse de Fourier de ce signal permet de distinguer des formes (carré ou rectangulaire) de micro délaminage ainsi que des taux de porosité. Par ailleurs, deux paramètres fréquentiels : la largeur de la bande et la fréquence centrale de « la fonction de transfert » semblent être un indicateur du taux de porosité. Cette fonction de transfert est calculée à partir des signaux de double transmission.

MOTS CLÉS

Ultrasons, matériaux composites, contrôle non destructif, atténuation.

SUMMARY

In order to identify flaws (porosity-micro delamination) in carbon resin composite materials by ultrasonic testing the amplitudes of the spectrum components of the echographic signal on the transmitted signal are used. The response of the carbon resin complex to an ultrasonic excitation is a sum of echos due to the reflections at the discontinuities of the propagation medium. Processing of the signal by Fourier analysis enables the type of micro delamination to be identified (square or rectangular) as well as the level of porosity. Two frequency parameters, the band width and the centre frequency of the transfer function seem to give a good indication of the degree of porosity of the material. This transfer function is calculated using the transmitted signal.

KEY WORDS

Ultrasound, composite materials, non destructive evaluation, attenuation.

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction

2. Atténuation ultrasonore

3. Méthode

- 3.1. Absorption en fonction de la fréquence
- 3.2. Coefficient d'atténuation

4. Résultats expérimentaux

5. Fonction de transfert de la porosité

6. Conclusions

Remerciements

Bibliographie

1. Introduction

Ce travail porte sur l'amélioration de la mesure du taux de porosité dans les matériaux composites de faible épaisseur, par exploitation du signal de double transmission.

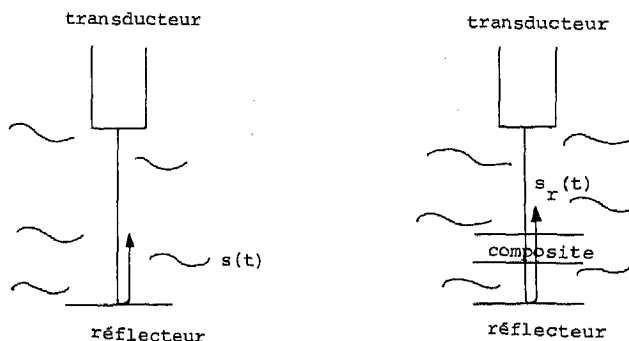
Le contrôle non destructif des plaques minces en carbone résine (0,6 à 3 mm) nécessite d'évaluer le taux de porosité ramené par plis de carbone. Cette mesure de porosité est faite à partir d'une formule empirique utilisant l'amplitude du signal de double transmission. Cette mesure entraîne des incertitudes importantes (de l'ordre de 30 %) dues à la faible épaisseur des plaques.

La méthode développée permet d'approcher le taux de porosité par une analyse spectrale du signal en calculant l'atténuation ultrasonore en fonction de la fréquence. Cette mesure se complète par l'exploitation de deux paramètres fréquentiels caractérisant les fonctions de transfert.

La méthode a été testée sur des plaques minces composite (carbone résine epoxy) ayant des taux de porosité obtenus par différents cycles de polymerisation.

2. Atténuation ultrasonore

Un transducteur ultrasonore fonctionnant en émetteur récepteur est immergé dans l'eau. Il génère une onde acoustique dans le milieu de couplage. Une partie de l'énergie est réfléchiée sur les discontinuités du milieu de propagation, l'autre partie est transmise puis réfléchiée sur une plaque de verre simulant un plan rigide infini, l'énergie qui retransverse le milieu est reçue par le transducteur. Ce signal représente soit la réponse impulsionnelle du transducteur soit la réponse en double transmission (DT) du complexe si une plaque est placée dans le champ du transducteur.



La transformée de Fourier du signal reçu $s_r(t)$ est le produit du spectre émis $s(v)$ -transformée de Fourier de $s(t)$ par la fonction de transfert associée à la tranche de matériau traversé deux fois. La figure 1 présente la réponse impulsionnelle du transducteur et le signal de DT d'un composite poreux, ainsi que leurs spectres respectifs.

La fonction de transfert de l'éprouvette tient compte de deux effets prépondérants, l'un constant qui fait intervenir les coefficients de transmission des interfaces eau-éprouvette, éprouvette-eau et matrice-car-

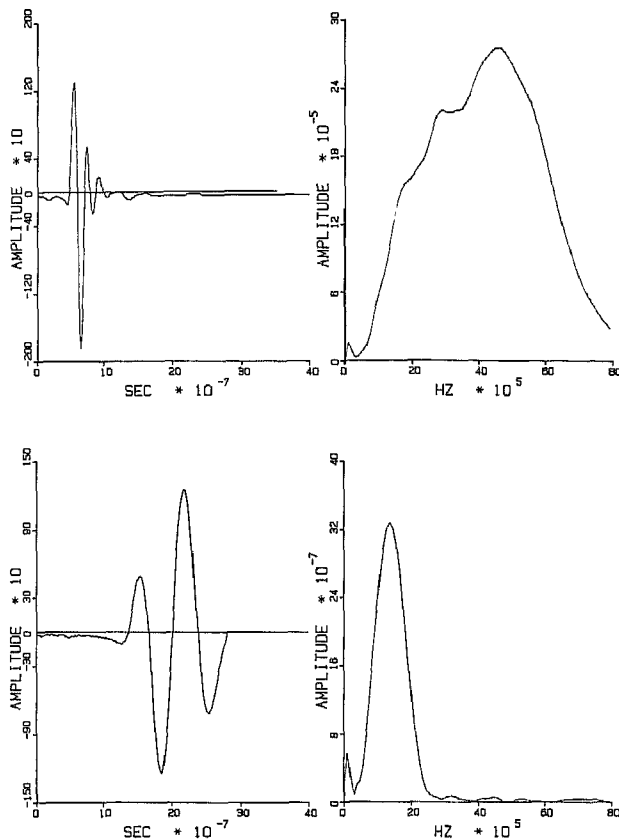


Fig. 1. — A, réponse impulsionnelle du transducteur; C, signal de DT d'un composite poreux; B, D, spectre des signaux A et C.

bone. Le second effet est l'atténuation due aux inhomogénéités qui est fonction de la fréquence :

$$S_r(\nu) = S(\nu) \times (K_{12} \times K_{21}) \times \left(\sum_{i=1}^{n-1} K_i \right)^2 \times \exp(-2a(\nu)d),$$

K_{12} est le coefficient de transmission à l'interface eau-composite, K_{21} est le coefficient de transmission à l'interface composite-eau, K_i est le coefficient de transmission au i -ème interface matrice-carbone, $a(\nu)$ est la fonction d'atténuation $= \alpha \nu^n$, d est l'épaisseur de l'éprouvette.

La dissociation de ces deux effets d'atténuation peut-être faite en prenant la différence des logarithmes des spectres :

$$10 \log(S_r(\nu)) - 10 \log(S(\nu)) = A_0 - 2a(\nu)d \text{ (en décibels).}$$

A_0 représente alors l'atténuation aux interfaces de l'éprouvette et l'atténuation constante à la matrice carbone-résine. En prenant comme signal de référence la réponse impulsionnelle du transducteur les deux effets d'atténuation sont séparés et peuvent être mesurés. De plus, on s'affranchit de la chaîne de mesure.

3. Méthode

3.1. ABSORPTION EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE

Les spectres sont modélisés par des formes gaussiennes, ce qui semble réaliste au vue de la forme des modules des spectres. Ces spectres gaussiens sont calculés en minimisant l'erreur quadratique moyenne $E = [s_{\text{exp}}(\nu) - s_{\text{calc}}(\nu)]^2$:

$$s(\nu) = \frac{1}{\sqrt{2\Pi} \sigma_0} \exp \frac{-(\nu - \nu_0)^2}{2 \sigma_0^2},$$

$$s_r(\nu) = \frac{1}{\sqrt{2\Pi} \sigma_0} \exp \frac{-(\nu - \nu_0)^2}{2 \sigma_0^2} \exp -2a(\nu)d,$$

$$s_r(\nu) = \frac{1}{\sqrt{2\Pi} \sigma_r} \exp \frac{-(\nu - \nu_r)^2}{2 \sigma_r^2}.$$

Si la fonction d'atténuation est de la forme $a(\nu) = \alpha \nu^2$. Le spectre du signal de double transmission peut s'écrire :

$$s_r(\nu) = \left[\frac{1 + 4 \sigma_0^2 \alpha d}{2 \Pi \sigma_0^2} \right]^{1/2} \exp \frac{-(\nu - \nu_0/1 + 4 \sigma_0^2 \alpha d)^2}{2 \sigma_0^2/1 + 4 \sigma_0^2 \alpha d}.$$

On remarque que le spectre subit un glissement fréquentiel $\Delta \nu$ et une variation $\Delta \sigma$ de son moment d'ordre deux :

$$\Delta \nu = \nu_r - \nu_0, \quad \Delta \sigma = \sigma_r - \sigma_0,$$

$$\nu_r = \frac{\nu_0}{1 + 4 \sigma_0^2 \alpha d}, \quad \sigma_r^2 = \frac{\sigma_0^2}{1 + 4 \sigma_0^2 \alpha d},$$

ν_0 , σ_0 , fréquence centrale et écart type du spectre émis; ν_r , σ_r , fréquence centrale et écart type du spectre du signal de DT.

La fonction d'atténuation mesurée en décibels est extraite dans le domaine de validité de $s_r(\nu)$. La dérivé seconde de cette courbe fournit le coefficient d'atténuation $2 \alpha d$ en dB/MHz².

3.2. COEFFICIENT D'ATTÉNUATION

Prendre le logarithme d'un spectre Gaussien revient à rendre parabolique cette courbe, le spectre $s(\nu)$ peut donc s'écrire :

$$10 \log [s(\nu)] = 10 \times \log \left[\frac{1}{\sqrt{2\Pi} \sigma_0} \exp \frac{-(\nu - \nu_0)^2}{2 \sigma_0^2} \right] = A_0 + B_0(\nu - \nu_0)^2.$$

La fonction d'atténuation s'écrit :

$$F(\nu) = 10 \cdot \log [s_r(\nu)] - 10 \log [s(\nu)] = A_r - A_0 + B_r(\nu - \nu_r)^2 - B_0(\nu - \nu_0)^2.$$

La dérivée seconde de cette fonction s'exprime alors de manière simple avec les coefficients B des paraboles :

$$\frac{\partial^2}{\partial \nu^2} [F(\nu)] = -4 \alpha d = 2(B_r - B_0) \text{ (en dB/MHz}^2\text{)}.$$

B_0 reste constant, c'est le coefficient du spectre du transducteur rendu gaussien. Il suffit par conséquent de calculer B_p , coefficient du spectre parabolique du signal de DT d'une éprouvette.

Cette méthode minimise le temps de calcul et permet d'extraire immédiatement du spectre le coefficient d'atténuation.

4. Résultats expérimentaux

Cette méthode est testée sur des plaques de 42 plis de carbone.

Le transducteur ultrasonore de large bande utilisé est de fréquence centrale 5 MHz, diamètre, 20 mm, distance focale 75 mm. Le point focal est placé au centre de l'éprouvette afin d'avoir le maximum d'énergie. Les signaux sont échantillonnés à 100 MHz par un analyseur de transitoire biomation 8100 et quantifiés sur 8 bits. Les données sont ensuite traitées sur un PDP 11/23. La figure 2 présente les spectres Gaussiens calculés à partir des spectres réels pour plusieurs taux de porosité. La figure 3 donne des courbes d'atténuation ultrasonore calculées par la différence des logarithmes des spectres pour les mêmes taux de porosité que la figure 2.

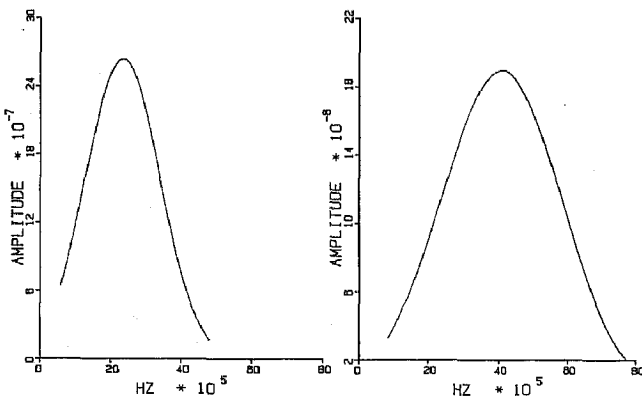
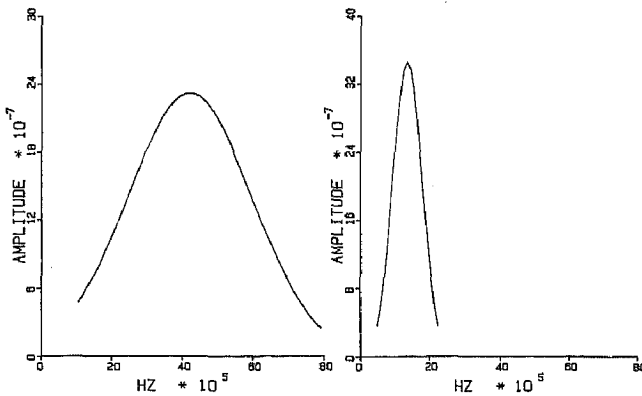


Fig. 2. — A, spectre de référence; B, C, D, représentent les spectres gaussiens pour différents taux de porosité 5, 3 et 1 %.

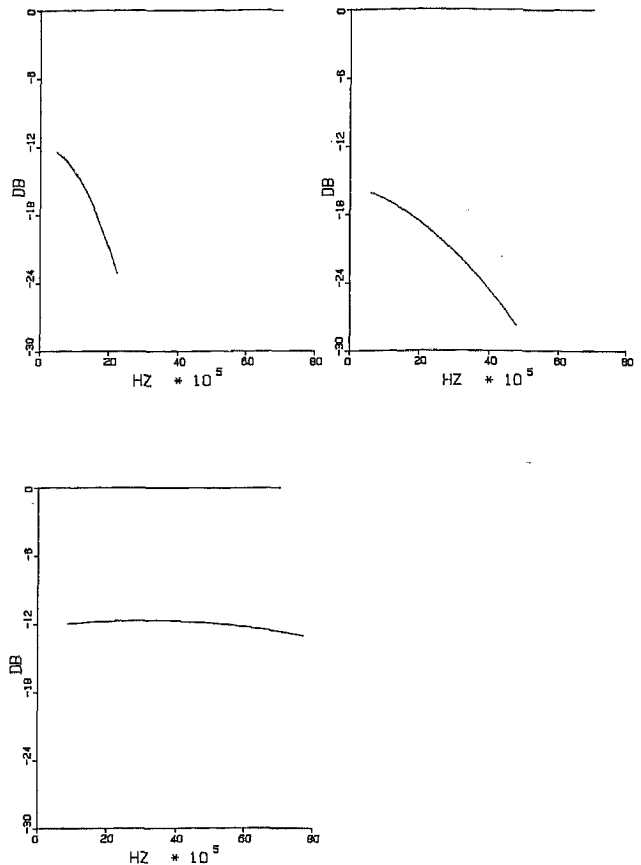


Fig. 3. — A, B, C, représentent la différence des logarithmes des spectres pour les taux de porosité 5, 3 et 1 % en fonction de la fréquence.

Porosité visée (%)	Coefficient (dB/MHz ² /plis)	Atténuation à 5 MHz (dB/plis)
1.	0,008	0,20
3.	0,022	0,55
5.	0,22	3,25

5. Fonction de transfert de la porosité

La mesure du coefficient α tient compte de l'atténuation intrinsèque de la matrice carbone résine et de l'atténuation due à la porosité, c'est une mesure globale. Afin de compléter cette information, il est intéressant de caractériser la fonction de transfert de la porosité. On considère pour cela deux fonctions de transfert : $H(v)$ la fonction de transfert associée à la matrice saine et $HP(v)$ la fonction de transfert associée à la porosité.

$$s_0(v) \boxed{H(v)} s(v) \boxed{HP(v)} s_r(v),$$

$s_0(v)$, spectre de référence du transducteur; $s(v)$, spectre du signal de DT d'une éprouvette saine étalon;

$s_r(v)$, spectre du signal de DT d'une éprouvette poreuse; $s_r(v) = s(v) \times HP(v)$.

Les deux paramètres choisis pour caractériser la fonction $HP(v)$ sont la fréquence centrale et largeur de bande. Tous deux définis au sens statistique en considérant la fonction de transfert comme une densité de probabilité.

La fréquence centrale ou premier moment :

$$v_c = \frac{\int v HP(v) dv}{\int HP(v) dv}$$

La largeur de bande ou deuxième moment centré :

$$B = 2 * \left[\frac{\int (v - v_c)^2 HP(v) dv}{\int HP(v) dv} \right]^{1/2}$$

Les bornes d'intégration sont déterminées à partir du domaine de validité de $s_r(v)$.

Résultats expérimentaux

Éprouvette			
Paramètres	Porosité visée 1 % (MHz)	Porosité visée 3 % (MHz)	Porosité visée 5 % (MHz)
Largeur de bande.	3.95	1.76	0.70
Fréquence centrale.	4.4	1.86	1.25

La fréquence centrale décroît et simultanément la largeur de bande subit une contraction en fonction du taux de porosité.

Ces deux paramètres testés sur le même lot d'éprouvettes semblent aussi de bons outils pour une approche globale de la porosité des plaques minces.

6. Conclusions

Cette méthode spectrale permet de séparer les deux effets d'atténuation, d'une part l'atténuation aux interfaces, d'autre part l'atténuation de l'éprouvette. De plus, on extrait directement du spectre modélisé par une forme gaussienne le coefficient d'atténuation.

Cette méthode n'est utilisable que sur les signaux de double transmission et donnent une mesure globale. Actuellement d'autres méthodes sont mises au point permettant une mesure locale de l'atténuation à partir du signal de réflexion. Elles permettront de contrôler les pièces épaisses.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Laboratoire Central de l'Aérospatiale qui a fourni les éprouvettes et spécialement MM. Arnaud et Lecuru pour les échanges intéressants qu'ils ont eus avec eux.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Philip F. PARTER, *Modulation, Noise and spectral analysis*.
- [2] Roman KUC, *Applying spectral-shift procedures for estimating acoustic attenuation to non gaussian spectra*, 1983 Ultrasonics Symposium, p. 831-834.