

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE  
DE LA TRANSMISSION D'ONDES ULTRASONORES PAR  
UN MILIEU STRATIFIE A TRIPLE COUCHE

N.AMARA et A.BENCHAALA

Laboratoire d'acoustique, Institut de Physique,  
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumedienne,  
BP 32 - El Alia - ALGER (ALGERIE)

RÉSUMÉ

Une évaluation théorique du coefficient de transmission d'un milieu stratifié, sans pertes, sollicité par des ondes planes ultrasonores est présentée. Expérimentalement, une méthode par analyse spectrale nous permet de déterminer la variation du coefficient de transmission en fonction de la fréquence et d'estimer la contribution de chaque couche du milieu.

**INTRODUCTION.**- L'étude de la propagation des ondes ultrasonores dans les milieux composites stratifiés à plusieurs couches a suscité un regain d'intérêt, et ceci en raison de leur possibilité de simulation des milieux naturels (biologique, sismique, fonds marins, etc.), de leur capacité d'adaptation et de filtrage acoustique. Les systèmes multicouche sont largement utilisés; néanmoins, une meilleure compréhension de leur propriétés permet de procéder au bon choix des constituants, du fait que chaque nouvelle couche offre plus de possibilités dans la conception. Pour ces raisons, nous avons tenté d'apporter une contribution à l'étude du phénomène de trans-

ABSTRACT

A theoretical evaluation of the transmission coefficient of a stratified media, without losses, insonified by ultrasonic plane waves is given. Experimentally, a spectral analysis method allows us to determine the variation of the transmission coefficient in function of the frequency and to estimate the contribution of each layer of the media.

mission d'ondes ultrasonores par un milieu stratifié triple épaisseur en fonction de la fréquence du signal d'émission.

Le problème a déjà fait l'objet d'études théoriques [1-3]; pour notre approche, nous nous sommes basés sur le modèle matriciel de Brekhovskikh. Du point de vue expérimental, nous avons choisi un milieu stratifié triple couche insoné par une impulsion de courte durée. Par analyse de Fourier, nous déterminons le spectre du signal transmis par le milieu considéré. L'exploitation de ces résultats permet d'estimer la contribution physique et géométrique de chaque couche du milieu stratifié dans la transmission.



**THEORIE.-** Soit un milieu stratifié à n couches, supposé sans pertes, sur lequel est incidente une onde plane élastique sous un angle  $\theta$  (fig.1). Le vecteur déplacement  $\vec{u}$  d'un point d'une couche l s'exprime en fonction des potentiels scalaire et vecteur par:

$$\vec{u}_l = \text{grad } \phi_l + \text{rot } \psi_l, \quad (1)$$

avec

$$\phi_l = [\phi_l' e^{i\alpha_l z} + \phi_l'' e^{-i\alpha_l z}] e^{i(\sigma x - \omega t)} \quad (2)$$

$$\psi_l = [\psi_l' e^{i\beta_l z} + \psi_l'' e^{-i\beta_l z}] e^{i(\sigma x - \omega t)} \quad (3)$$

où  $\alpha_l$  et  $\beta_l$  représentent la composante verticale des vecteurs d'onde longitudinal et transversal; et  $\sigma$  la composante horizontale.

Les composantes tangentielle et normale des contraintes s'écrivent :

$$T_x^{(l)} = \mu_l \left[ 2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right] \quad (4)$$

$$T_z^{(l)} = \lambda_l \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right] + 2\mu_l \left[ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right] \quad (5)$$

où  $\lambda_l$  et  $\mu_l$  désignent les coefficients de Lamé. Les conditions aux limites requièrent la continuité, au niveau des interfaces, des composantes normale et tangentielle du déplacement et des contraintes. De ces conditions, nous pouvons établir une relation matricielle entre les grandeurs mécaniques de la couche n et de la couche 1, qui s'écrit :

$$\begin{bmatrix} u_x^{(n)} \\ u_x^{(n)} \\ u_z^{(n)} \\ T_z^{(n)} \\ T_x^{(n)} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} u_x^{(1)} \\ u_x^{(1)} \\ u_z^{(1)} \\ T_z^{(1)} \\ T_x^{(1)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{avec } [A] = [a_n][a_{n-1}] \dots [a_2] \quad (7)$$

où  $[a_i]$  est la matrice de couche de la strate i, dont les éléments sont explicités dans [2].

Dans notre cas, le milieu stratifié est immergé dans l'eau, nous pouvons donc écrire:  $T_x^{(n)} = T_x^{(1)} = 0$ . (8)

A partir de cette équation et en tenant compte de (6) nous déduisons l'expression théorique du coefficient de transmission :

$$W = \frac{\rho_1 \phi_1''}{\rho_{n+1} \phi_{n+1}''} = \frac{-2i\omega Z_1}{(M_{32} - i\omega Z_1 M_{33}) - (i\omega M_{22} + Z_1 \omega M_{23}) Z} \quad (9)$$

$$\text{avec } Z_i = \frac{\rho_i c_i}{\cos(\theta_i)}$$

$$M_{ik} = A_{ik} - \frac{A_{i1} A_{4k}}{A_{41}}, \quad i, k = 2, 3, 4$$

où  $Z_i$  est l'impédance acoustique du milieu i,  $\rho_i$  est la masse volumique du milieu i et  $c_i$  la vitesse longitudinale dans le milieu i.

**DETERMINATION EXPERIMENTALE DU COEFFICIENT DE TRANSMISSION.-**

*Principe de la méthode-* Assimilons le milieu stratifié à un système linéaire de réponse impulsionnelle  $h(t)$ . Dans le domaine temporel, le signal de sortie  $s(t)$  est lié au signal d'entrée  $e(t)$  par l'équation de convolution:

$$s(t) = h(t) * e(t) \quad (10)$$

En effectuant une transformation de Fourier par rapport au temps sur l'équation (10), nous obtenons la relation suivante [4]:

$$S(\nu) = H(\nu).E(\nu) \quad (11)$$

$\nu$  représentant la fréquence,  $H(\nu)$  la fonction de transfert du système.

A partir de l'équation (11), nous pouvons écrire:

$$H(\nu) = \frac{S(\nu)}{E(\nu)} \quad (12)$$

Remarquons que le coefficient de transmission de l'échantillon étudié, est en fait  $|H(\nu)|$ .

**Dispositif expérimental-** Le dispositif expérimental est schématisé sur la fig.2. Un triplet Aluminium/Résine/Aluminium, où l'épaisseur de chaque couche est respectivement  $d_1=1\text{mm}/d_2=1.5\text{mm}/d_3=1\text{mm}$ , est immergé dans une cuve d'eau équipée de deux transducteurs, de fréquence centrale 5MHz et de bande passante allant de 3MHz à 7MHz, jouent le rôle d'émetteur et de récepteur. Le signal émis est une impulsion de courte durée arrivant sur l'échantillon sous une incidence normale. Le signal transmis par l'échantillon est recueilli par le récepteur; ce signal est amplifié, filtré et visualisé sur un oscilloscope (fig.3 et 4). Après un échantillonnage sur 2000 points, les données sont alors sauvegardées sur disquettes pour des traitements ultérieurs. L'analyse spectrale des signaux est effectuée par un programme de transformation de Fourier rapide (FFT). L'évolution du coefficient de transmission en fonction de la fréquence (fig.7) est donnée par le rapport des spectres du signal reçu à travers l'échantillon et du signal correspondant sans échantillon (fig.5 et 6).

**Résultats expérimentaux-** Nous identifions, sur la fig.7, les résonances qui apparaissent pour les couches d'Aluminium et de résine par  $(Al)_n$  et  $(Rés)_n$ , où  $n$  indique le mode; les indices  $l$  et  $t$  indiquent la nature, longitudinale ou transversale, du mode. Les résonances sont calculées par l'expression:  $f = n \frac{c}{2d}$ , qui traduit l'existence d'un nombre entier de demi-longueur d'onde dans la couche. La vitesse longitudinale et la vitesse transversale sont respectivement de 6360m/s et 3130m/s pour l'Aluminium, et de 2770m/s et 1363m/s pour la résine. L'existence de modes transversaux en incidence normale s'explique par le fait que la directivité du transducteur est non parfaite.

**CONCLUSION.-** Nous avons vu dans cette étude, une méthode d'évaluation du coefficient de transmission par analyse spectrale. Cette méthode est avantageuse car elle est assez rapide et fournit des résultats satisfaisants.

**Références.-**

- [1] W.T.Thompson, "Transmission of elastic waves through a stratified solid medium", J.Appl.Phys., **21**, 1950.
- [2] L.M.Brekhovskikh, "Waves in layered media", Academic Press, New York, 1960.
- [3] D.L.Folds and G.D.Loggins, "Transmission and reflection of ultrasonic waves in layered media", J.Acoust.Soc.Am., **82**, 1102-1109 (1977)
- [4] J.Max, "Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques", Masson, Paris 1977.

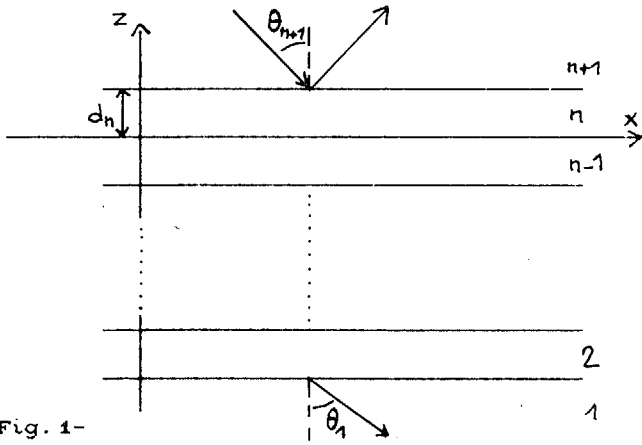


Fig. 1- Description du milieu stratifié.

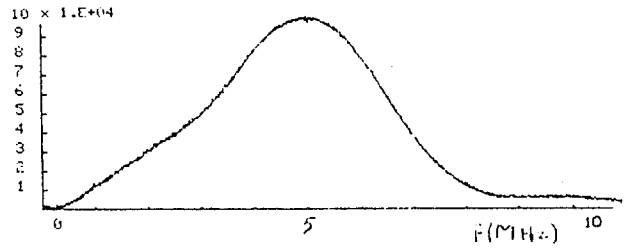


Fig.5- Spectre du signal reçu à vide.

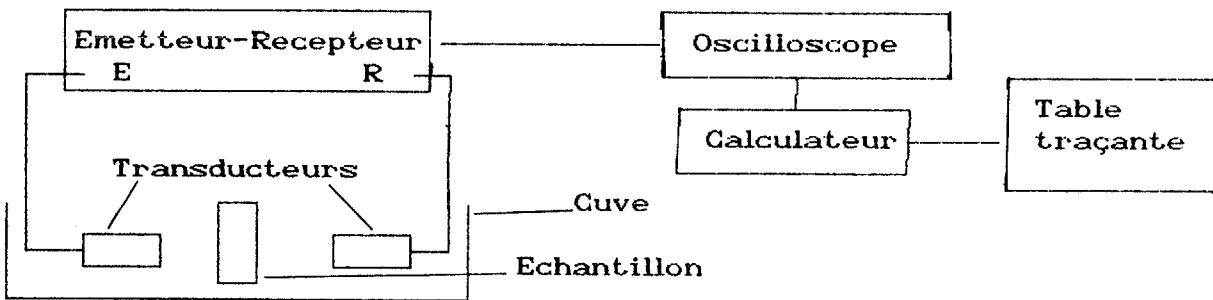


FIG. 2- Schéma synoptique du dispositif expérimental

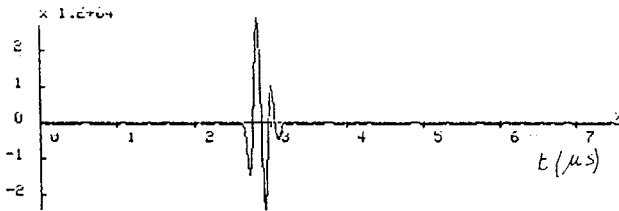


Fig.3- Signal reçu à vide

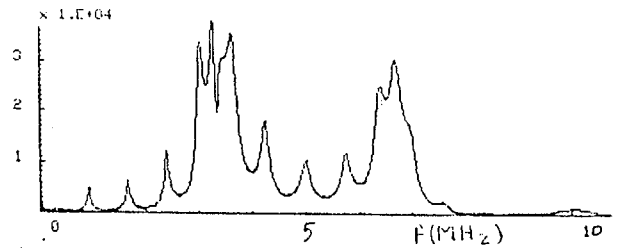


Fig.6- Spectre du signal transmis par l'échantillon.

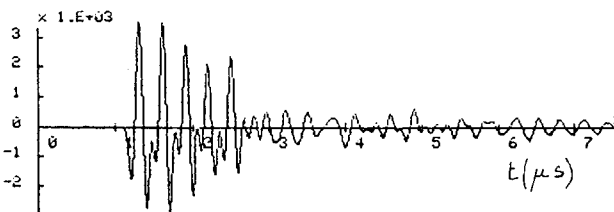


Fig.4- Signal transmis par l'échantillon Aluminium-Résine-Aluminium.

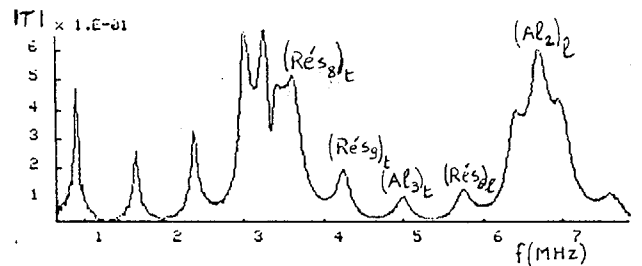


Fig.7- Coefficient de transmission du triplet Alu./Resine/Alu..