

**Perturbations introduites par
un ensemble de diffuseurs sur
la propagation des ondes ultrasonores**

One the perturbations induced by a collection of scatterers

on ultrasonic wave propagation



Jacques FROHLY

Laboratoire d'Opto-Acousto-Électronique, UA CNRS n° 832, Université de Valenciennes, 59326 VALENCIENNES CEDEX

Professeur à l'ENSI de Mécanique Énergétique de Valenciennes chargé des cours de Contrôle Non Destructif et de Corrosion.

Directeur du Département Maintenance Industrielle de l'IUT de Valenciennes et Président de la CPN de la spécialité. Recherches sur la propagation des ondes ultrasonores dans les milieux hétérogènes en vue de leur contrôle non destructif et de leur caractérisation.



Christian BRUNEEL

Laboratoire d'Opto-Acousto-Électronique, UA CNRS n° 832, Université de Valenciennes, 59326 VALENCIENNES CEDEX

Professeur à l'Université de Valenciennes.

Applications des ultrasons au contrôle non destructif : propagation des ultrasons dans les milieux hétérogènes – mesure d'épaisseurs de films minces par interférométrie ultrasonore.

Composants acousto-optiques et leurs applications.



Marc, Georges GAZALET

Laboratoire d'Opto-Acousto-Électronique, UA CNRS n° 832, Université de Valenciennes, 59326 VALENCIENNES CEDEX

Enseignant-Chercheur. Maître-Assistant à l'Université de Valenciennes.

Électronique-microinformatique et Programmation à l'ENSI de Valenciennes.

Acousto-optique, application à la projection d'images vidéo sur grand écran par lasers.

Contrôle non destructif par ultrasons et en particulier la caractérisation des milieux hétérogènes à deux phases.



João Manuel PERDIGÃO

Laboratoire d'Opto-Acousto-Électronique, UA CNRS n° 832, Université de Valenciennes, 59326 VALENCIENNES CEDEX

Après des études d'Ingénieur électrotechnicien à l'Université de Porto (Portugal), João Perdigão a enseigné en tant qu'assistant à l'Université de Coimbra (Portugal) de 1974 à 1981. Ensuite il est parti en stage en France pendant 3 ans (de 1981 à 1984) et a soutenu une thèse de 3^e cycle – optimisation du contrôle par ultrasons des milieux hétérogènes – à l'Université de Valenciennes (France).

RÉSUMÉ

Nous présentons les résultats d'une étude théorique et expérimentale menée dans le cas de milieux hétérogènes pour lesquels les dimensions des diffuseurs sont comparables à la longueur d'onde.

Deux modèles sont présentés permettant respectivement de décrire par un bilan énergétique les conditions de propagation en régime incohérent prédominant et par un modèle de gradient de phase la dégradation progressive de la cohérence de phase.

Ces résultats théoriques ont été confirmés expérimentalement. Nous présentons les résultats obtenus dans des situations caractéristiques correspondant à différents niveaux de perturbations. La présence d'ondes incohérentes se manifeste par une dégradation de la directivité du faisceau acoustique, des fluctuations importantes de l'amplitude du signal reçu et une diminution du coefficient d'atténuation des ondes ultrasonores.

MOTS CLÉS

Ultrasons-milieux hétérogènes, diffusion multiple, contrôle non destructif.

SUMMARY

Experimental and theoretical results of the study of the ultrasonic wave propagation in heterogeneous media are reported. We consider a situation where the heterogeneities dimensions are of the order of one wavelength. Two theoretical models are developed, the first one describing the propagation of the incoherent mode and the second one describing the progressive loss of the phase coherence.

The theoretical findings are confirmed by the experimental results. When the incoherent mode predominates, a degradation of the beam directivity arises together with a reduction of the attenuation factor.

KEY WORDS

Ultrasonic waves-heterogeneous media, multiple scattering, non destructive evaluation.

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction
 2. Modèle de diffusion de phonons
 3. Modèle du gradient de phase
 4. Résultats expérimentaux
 5. Conclusion
- Bibliographie

1. Introduction

La problématique, liée à la propagation des ondes ultrasonores dans les milieux hétérogènes, est basée principalement sur l'évolution de l'atténuation des ondes, sur l'éventuelle existence d'une fréquence seuil au-delà de laquelle les techniques d'imagerie ultrasonore par reconstruction de phase deviennent inapplicables et enfin, sur la possibilité d'établir une corrélation entre les caractéristiques des milieux hétérogènes et les paramètres ultrasonores, en vue d'une caractérisation de ces matériaux.

Dans un milieu hétérogène, il y a lieu de distinguer deux types de trajets possibles correspondant à deux types d'onde de même fréquence :

- le trajet direct auquel est associé une onde, appelée onde cohérente, dont la phase est parfaitement déterminée;

- des trajets indirects et multiples auxquels correspondent des ondes, appelées ondes incohérentes, pour lesquels l'information de phase est perdue.

De nombreux modèles théoriques ont été développés [1], dont deux dans le cas où les dimensions des diffuseurs dispersés dans le milieu matrice sont comparables à la longueur d'onde. Le premier permet, par un bilan énergétique de caractériser le régime incohérent [2]. Le second effectue un bilan en amplitude et en phase des signaux ultrasonores transmis, il prévoit l'existence d'un régime de transition entre les régimes cohérent et incohérent et permet de décrire le passage de l'un à l'autre [4].

2. Modèle de diffusion de phonons

Basé sur la théorie de la diffusion des phonons par les particules, ce modèle permet le calcul du coefficient d'atténuation pour les deux types d'onde, ainsi que l'évaluation de la distance de cohérence L_0 pour

DIFFUSION PAR DES INHOMOGENÉITÉS

laquelle le rapport des niveaux cohérent et incohérent de l'onde reçue est égal à l'unité.

La puissance acoustique cohérente reçue au niveau du transducteur est :

$$(1) \quad P_C = P_0 \exp(-\alpha L),$$

où $\alpha = n_0 \gamma$ (avec γ section efficace de diffusion et n_0 densité volumique d'hétérogénéités).

Dans le cas où le régime incohérent prédomine, on montre que la puissance incohérente reçue P peut s'écrire :

$$(2) \quad P = P_0 \frac{3\lambda^2}{2\pi t S \beta} \exp(-\beta L),$$

où P_0 est la puissance émise par la source de surface S et t le libre parcours moyen entre deux collisions : β apparaît alors comme un facteur d'atténuation :

$$(3) \quad \beta^2 = \frac{3\alpha_m}{t},$$

avec α_m facteur d'atténuation du milieu matrice. Ainsi la distance de cohérence L_0 définie précédemment peut être calculée à partir des conditions aux limites $P = P_C$ en $L = L_0$, d'où :

$$(4) \quad L_0 \approx \frac{1}{\alpha} \text{Log}_e \frac{2\pi t S \beta}{3\lambda^2}.$$

3. Modèle du gradient de phase

En considérant un ensemble de N couloirs s'étendant entre deux transducteurs, l'un émetteur, l'autre récepteur, on détermine les répercussions sur l'amplitude du signal reçu des fluctuations de phase dues à la répartition aléatoire des obstacles entre les deux transducteurs. Ces couloirs sont décomposés en cases élémentaires cubiques de volume identique à celui des obstacles. Un calcul statistique montre que l'écart quadratique des signaux recueillis sur différents échantillons est directement relié au niveau de l'onde incohérente.

Celui-ci présente un spectre angulaire beaucoup plus large que celui de l'onde cohérente et le niveau du signal incohérent capté décroît quand N augmente, donc, lorsque la surface du transducteur augmente. Dès que l'écart quadratique est faible, la valeur moyenne correspond au niveau de l'onde cohérente.

Lorsque la longueur L des couloirs est faible, le signal recueilli est essentiellement cohérent, dans ce cas, l'atténuation des ondes cohérentes sera, en désignant par C le côté d'une case élémentaire :

$$(5) \quad \alpha = \alpha_{\text{coh}} = -\frac{20}{C} \text{Log}_{10} |1 - p(1-t)| \quad \text{db/unité longueur},$$

où p = probabilité pour une case d'être occupée par un obstacle et t coefficient de transmission complexe d'un obstacle.

A partir du moment où L est très grand, le désordre dans l'échantillon augmente, le signal devient essentiellement incohérent, l'atténuation est alors :

$$(6) \quad \alpha = \alpha_{\text{inc}} = \frac{10}{C} \text{Log}_{10} [1 - p(1-|t|^2)] \quad \text{db/unité longueur}.$$

La transition entre ces deux situations extrêmes s'effectue autour d'une profondeur critique L_0 , distance de cohérence, pour laquelle le niveau cohérent et le niveau incohérent sont égaux :

$$(7) \quad L_0 = \frac{C \text{Log}_e(N+1)}{\text{Log}_e [1 - p(1-|t|^2)] - 2 \text{Log}_e |1 - p(1-t)|}.$$

4. Résultats expérimentaux

Nous avons effectué, à l'aide d'un dispositif électronique analogique (fig. 1) les relevés de la valeur moyenne \bar{x} et de l'écart quadratique moyen σ des signaux recueillis en fonction de l'orientation θ du transducteur de réception pour différentes valeurs des

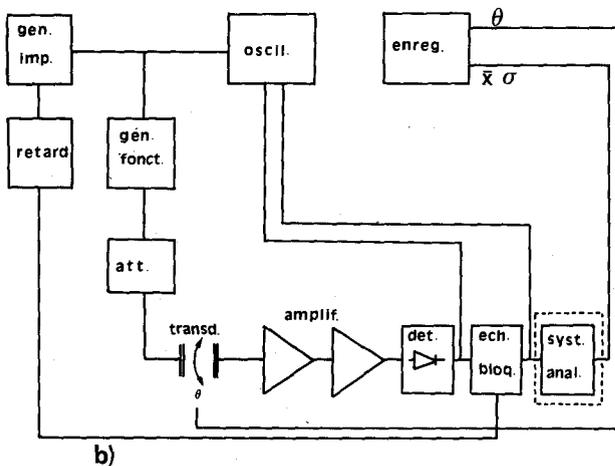
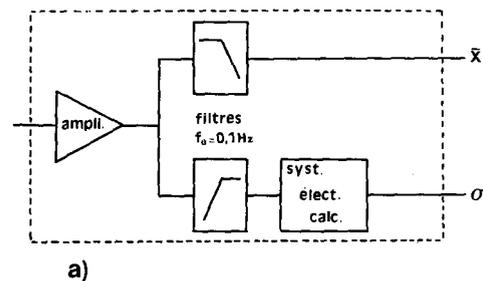


Fig. 1. — Montage expérimental : (a) système analogique de mesure; (b) montage expérimental utilisé.

paramètres : distance D , pourcentage volumique p.c.v. = p et fréquence F . Ces mesures furent effectuées dans un milieu fluide au sein duquel, des billes de polystyrène de diamètre 1 mm, étaient maintenues en suspension, par agitation. Cette disposition permet d'assurer une évolution permanente des échantillons et d'effectuer des mesures statistiques significatives.

A titre d'exemple, nous présentons sur la figure 2 les évolutions déterminées expérimentalement de \bar{x} et σ dans trois situations typiques correspondant aux différents régimes.

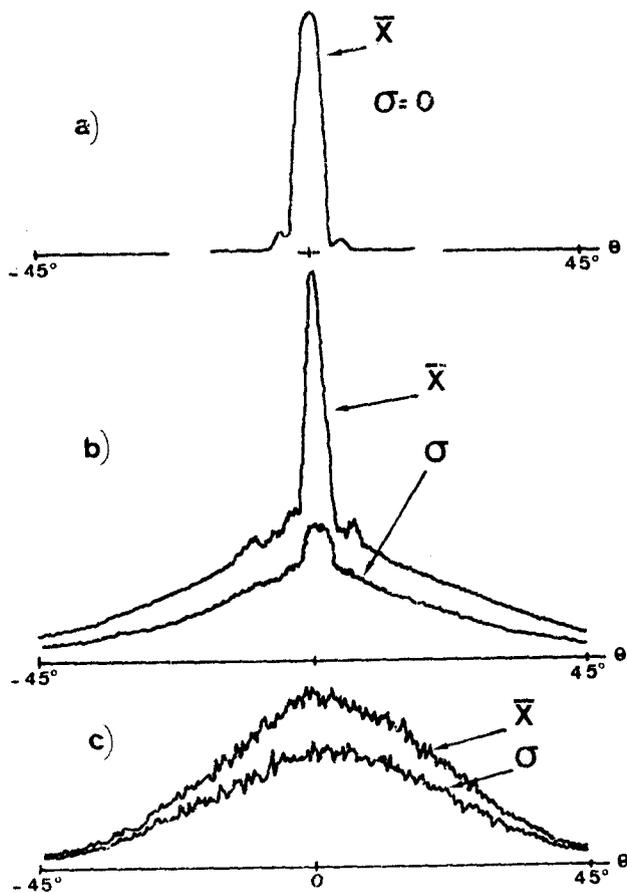


Fig. 2. — Évolution expérimentale de \bar{x} et σ dans trois positions type : (a) régime purement cohérent; (b) niveau des signaux cohérent et incohérent du même ordre; (c) régime purement incohérent.

Les courbes de la figure 2a ont été obtenues en l'absence d'hétérogénéités. Elles correspondent à un régime cohérent pur pour lequel $\sigma/\bar{x}=0$. Les courbes 2b, obtenues avec $p=3\%$ mettent en évidence la présence simultanée des régimes cohérent et incohérent. Dans ce cas, σ/\bar{x} vaut 70 % en dehors de l'axe du transducteur et 35 % au voisinage de $\theta=0$.

La figure 2c obtenue pour $p=9\%$ met en évidence un élargissement du diagramme de rayonnement et une augmentation marquée de l'écart quadratique moyen qui sont significatifs d'un régime complètement incohérent. Le rapport σ/\bar{x} relevé dans l'axe du transducteur prend alors des valeurs notables de $\sigma/\bar{x} \approx 70\%$ sur toute la plage angulaire.

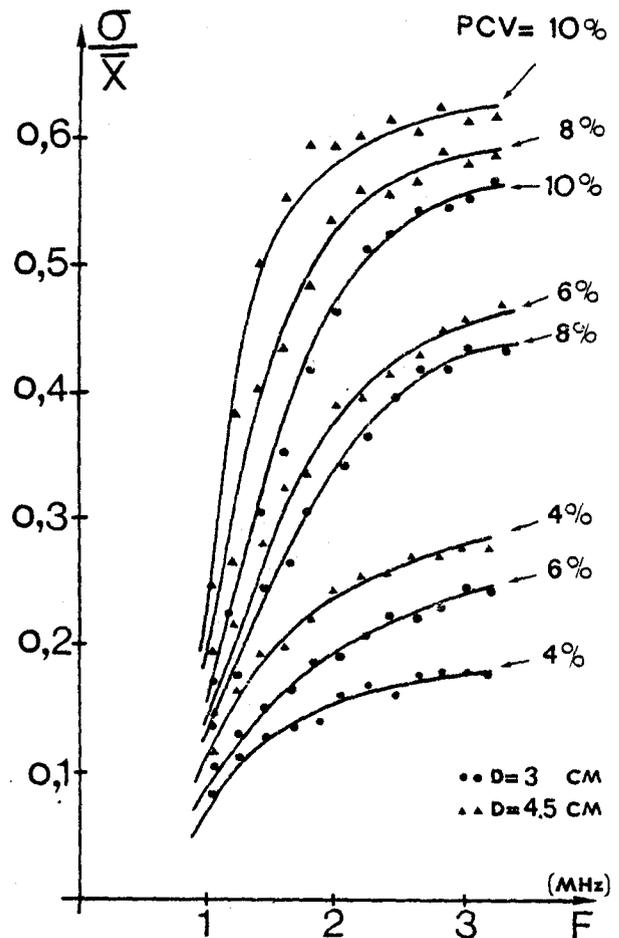


Fig. 3. — Évolution du rapport σ/\bar{x} en fonction de la fréquence.

Le paramètre σ/\bar{x} en $\theta=0$ apparaît donc comme un élément essentiel à prendre en compte pour décrire les différentes situations et les poids respectifs des niveaux cohérent et incohérent (fig. 3).

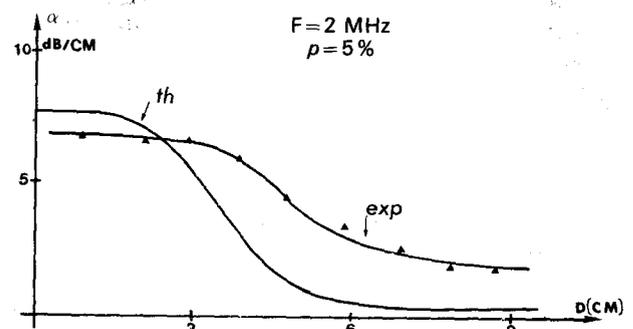


Fig. 4. — Comparaison des valeurs théoriques et expérimentales de l'atténuation en fonction de la distance de propagation.

Nous avons déterminé expérimentalement les valeurs des coefficients d'atténuation. Pour cela, nous avons suivi l'évolution en fonction de D du rapport des valeurs moyennes \bar{x} du signal relevées dans l'axe du transducteur. La figure 4 met clairement en évidence les deux régimes d'atténuation que les calculs laissent prévoir ainsi qu'un régime de transition.

DIFFUSION PAR DES INHOMOGÉNÉTÉS

5. Conclusion

Le modèle de gradient de phase permet de mettre en évidence l'existence d'une plage de transition entre les deux régimes cohérent et incohérent.

Ainsi le terme σ/\bar{x} apparaît comme un paramètre fondamental, caractéristique de la présence relative des différents niveaux cohérent et incohérent.

Son évolution, en fonction de la fréquence F est corrélée aux caractéristiques du milieu et doit permettre d'obtenir des informations qualitatives et quantitatives sur les milieux hétérogènes. D'un caractère original, les manipulations ont toujours été effectuées, contrairement aux essais développés dans la littérature, soit dans le cas d'un régime incohérent prédominant, soit dans le cas où le niveau cohérent est comparable au niveau incohérent.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. LAX, Multiple scattering of waves, *Rev. Mod. Phys.*, 23, 1951, p. 287-310.
- [2] A. ISHIMARU, Theory and applications of wave propagation and scattering in random media, *Proc. I.E.E.E.*, 65, (7), 1977, p. 1030-1061.
- [3] M. GAZALET, J. FROHLY, J. PERDIGAO et C. BRUNEEL, Incoherent ultrasonic wave attenuation in inhomogeneous media, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 76, 1984, p. 1259-1261.
- [4] M. GAZALET, J. PERDIGAO, J. FROHLY et C. BRUNEEL, Propagation des ondes ultrasonores dans les milieux hétérogènes. Limitation à l'utilisation des techniques ultrasonores en contrôle non destructif, *European conference on Non Destructive Testing*, Florence, octobre 1984, p. 312-324.