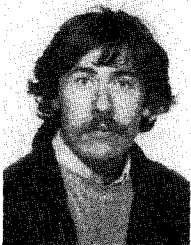


Analyse cepstrale  
en contrôle non destructif  
des milieux hétérogènes

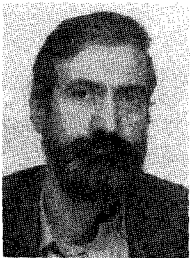
Non destructive evaluation of heterogeneous media  
using cepstrum analysis



**Christophe DELEBARRE**

Laboratoire d'Opto-Acousto-Électronique, UA CNRS n° 832, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, LE MONT HOUY, 59326 VALENCIENNES CEDEX.

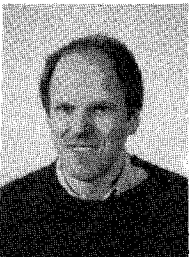
Enseignant-chercheur à l'Université de Valenciennes. Électronique et Informatique à l'ENSI de Valenciennes. Applications des ultrasons au contrôle non destructif : propagation des ultrasons dans les milieux hétérogènes, mesure d'épaisseurs de films minces par interférométrie ultrasonore. Imagerie ultrasonore et traitement du signal.



**Christian BRUNEEL**

Laboratoire d'Opto-Acousto-Électronique, UA CNRS n° 832, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, LE MONT HOUY, 59326 VALENCIENNES CEDEX.

Professeur à l'Université de Valenciennes. Directeur du laboratoire OAE. 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.



**Jean-Étienne LEFEBVRE**

Laboratoire d'Opto-Acousto-Électronique, UA CNRS n° 832, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, LE MONT HOUY, 59326 VALENCIENNES CEDEX.

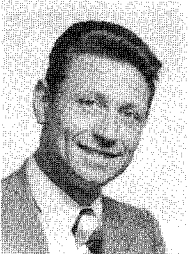
Assistant à l'Université de Valenciennes. Application des ultrasons au contrôle non destructif, propagation dans les milieux hétérogènes, mesure d'épaisseurs de films minces par interférométrie ultrasonore et par variation du coefficient de transmission à travers le film, caractérisation de l'adhésion par ondes de surface et ondes de Lamb.



**Jean-Michel ROUVAEN**

Laboratoire d'Opto-Acousto-Électronique, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, LE MONT HOUY, 59326 VALENCIENNES CEDEX.

Professeur à l'ENSI de Mécanique Énergétique de Valenciennes, chargé des cours d'Électronique, Numérique et d'Informatique. Directeur des Études de cette même ENSI. Recherches en contrôle non destructif par microscopie acoustique et en traitement du signal ultrasonore et acousto-optique.



**Jacques FROHLY**

Laboratoire d'Opto-Acousto-Électronique, UA CNRS n° 832, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, LE MONT HOUY, 59326 VALENCIENNES CEDEX.

Professeur à l'ENSI de Mécanique Énergétique de Valenciennes chargé des cours de Contrôle Non Destructif et de Corrosion. Président de la Commission Pédagogique Nationale de Maintenance Industrielle. Recherche sur la propagation des ondes ultrasonores dans les milieux hétérogènes en vue de leur contrôle non destructif et de leur caractérisation.

**RÉSUMÉ**

Nous présentons une approche nouvelle du contrôle non destructif par ultrasons des milieux hétérogènes. Elle permet, à l'aide de l'analyse cepstrale du signal rétrodiffusé, une caractérisation de la structure du milieu étudié.

L'allure du spectre du signal rétrodiffusé est corrélée à la structure de l'échantillon. L'introduction de l'analyse cepstrale permet d'obtenir une information sur l'espacement moyen entre les diffuseurs et donc sur le pourcentage volumique d'hétérogénéités dans le cas d'un milieu hétérogène à deux phases. Un ensemble de simulations permet de mettre en évidence l'intérêt de l'analyse cepstrale par rapport à l'analyse spectrale. Ces résultats théoriques sont confirmés expérimentalement.

**MOTS CLÉS**

Milieux hétérogènes, ultrasons, caractérisation, analyse cepstrale.

**SUMMARY**

*A new direction for the non destructive evaluation of heterogeneous materials is presented, which relies on the cepstrum of the backwards diffused signal for the characterization of the internal structure of the medium under study.*

*The spectrum of the reflected signal is correlated to the sample structure. By using the cepstrum transform, informations about the mean spacing between the scatterers and the volume percent of heterogeneities may be obtained for biphase media. A set of simulations make the advantages of the cepstrum analysis over the spectral analysis clear. The theoretical results are compared with experiments.*

**KEY WORDS**

*Heterogeneous media, ultrasound, characterization, cepstrum analysis.*

**1. Introduction**

Le fonctionnement des systèmes actuels d'imagerie ultrasonore repose sur des méthodes de détection de l'enveloppe des échos réfléchis par les structures observées. L'image obtenue est une représentation de l'intensité de ces échos.

Malheureusement l'utilisation de ces systèmes dans le cas des matériaux hétérogènes est très limitée. En effet, au-delà d'une certaine distance appelée longueur de cohérence, toute réalisation d'images par reconstruction de phase est impossible [1].

Cette distance de cohérence, au-delà de laquelle le régime des ondes incohérentes prédomine, dépend de la concentration et de la taille moyenne des diffuseurs ainsi que de la longueur d'onde. Elle est généralement de l'ordre de quelques centimètres dans le cas des milieux fortement hétérogènes où le taux volumique d'hétérogénéités peut atteindre 50 % [2]. Cependant, le transducteur, qui est un dispositif sensible à la pression, enregistre également une information de phase, dont il n'est pas tenu compte actuellement dans l'exploitation de l'image ni dans le processus de mesures.

Cette information supplémentaire possède toutefois une signification dans la mesure où elle décrit l'interaction entre le faisceau ultrasonore et le milieu exploré, dont les propriétés acoustiques peuvent être corrélées avec un état spécifique.

Ainsi introduit-on dans cet article des méthodes permettant d'extraire et de séparer les caractéristiques physiques les plus significatives de cette interaction et de mettre en évidence la signature ultrasonore du milieu en vue d'un contrôle différencié

Les méthodes décrites ci-dessous sont toutes basées sur des techniques de traitement de signal qui permettent d'utiliser de manière plus efficace toute l'information contenue dans l'onde ultrasonore.

A partir de l'interrogation d'un milieu hétérogène à l'aide d'une impulsion ultrasonore connue et de l'enregistrement du signal rétrodiffusé appelé ligne échographique ou ligne A, il apparaît deux approches possibles dans l'utilisation des informations obtenues.

Dans la première, que l'on peut dénommer imagerie quantitative, on cherche à établir une cartographie d'un ou plusieurs des paramètres d'interaction comme l'atténuation par exemple.

Dans la seconde, qui est la caractérisation du milieu, on tente d'évaluer quantitativement quelques-uns des paramètres physiques caractéristiques des milieux explorés tels que la granulométrie ou le pourcentage volumique d'hétérogénéités et de décrire les variations spatiales et/ou temporelles de leurs propriétés. Nous nous intéresserons ici plus particulièrement à ce deuxième type d'approche, en comparant deux méthodes de mesure de l'espacement moyen des réflecteurs, l'une basée sur l'analyse du spectre de puissance et l'autre sur l'analyse du cepstre de puissance du signal échographique.

**2. Présentation de l'analyse cepstrale et spectrale****2.1. STRUCTURE DU SIGNAL ÉCHOGRAPHIQUE**

La mesure des paramètres d'interaction de l'onde acoustique avec le milieu considéré a été décrite par

de nombreux auteurs comme Jones [3] et Fink [4] et présente un intérêt considérable dans la caractérisation de nombreux milieux hétérogènes.

Si on considère que l'atténuation observée résulte à la fois de l'absorption des ultrasons dans le milieu et de la diffusion par les hétérogénéités, on peut modéliser le milieu hétérogène relativement complexe par des diffuseurs ponctuels noyés dans un milieu homogène atténuant. A partir de ce modèle de diffuseurs discrets, le signal échographique dû à toutes les réflexions sur ces diffuseurs peut être mis sous la forme d'une chaîne de convolution. Ce qui permet de traiter le problème de l'analyse de la rétrodiffusion ultrasonore dans les milieux hétérogènes à l'aide de l'approximation du système linéaire.

$$(1) \quad s(t) = \sum_i e(t) * i_i(t) * h(r_i, t) * a(r_i, t) * \mu(r_i, t) * h(r_i, t) * i_r(t)$$

où :

- le symbole \* désigne l'opérateur de convolution;
- la sommation porte sur tous les diffuseurs dont les positions par rapport au transducteur sont données par les vecteurs  $r_i$ ;

- $e(t)$  est la forme d'onde de l'impulsion appliquée au transducteur;

- $i_i(t)$  est la réponse électroacoustique du transducteur en émission et  $i_r(t)$  est celle de réception.

L'onde se propageant jusqu'au diffuseur  $r_i$ , trois fonctions dépendant du temps et de la position du diffuseur contrôlent cette propagation :

- $h(r_i, t)$  est la réponse impulsionnelle de diffraction;
- $a(r_i, t)$  fonction caractéristique de l'atténuation, dont la fonction de transfert associée  $A(r_i, f)$  peut être modélisée sous la forme :

$$(2) \quad A(r_i, f) = \exp(-\beta f^n |r_i|)$$

où  $\beta f^n$  est la loi d'atténuation;

- $\mu(r_i, t)$  fonction de diffusion qui dépend des caractéristiques de rétrodiffusion, c'est-à-dire géométrie et position du diffuseur situé au point  $r_i$ .

On retrouve ensuite les fonctions modélisant la propagation inverse, du point  $r_i$  jusqu'au transducteur.

En prenant la transformée de Fourier de l'expression (1), on obtient :

$$(3) \quad S(f) = E(f) I_r(f) I_i(f) \sum H^2(r_i, f) A^2(r_i, f) U(r_i, f)$$

Cette expression contient un spectre invariant associé au transducteur, déformé par une fonction de filtrage dépendant de la profondeur d'exploration et contenant des termes associés au milieu exploré.

Ce modèle de convolution pour la formation d'une ligne A dans un milieu hétérogène, montre que la forme du spectre de puissance d'une séquence d'échos est limitée en fréquence et se trouve définie à la fois par l'impulsion incidente et la fonction de transfert du milieu.

Ainsi, ce sont les modulations superposées au spectre de l'impulsion d'émission qui contiennent l'information relative à la structure explorée.

En particulier, si l'on considère N impulsions identiques, provenant par exemple des réflexions sur des diffuseurs, toutes séparées par le même retard de  $2t_0$ , on peut montrer que le spectre de ce signal est celui d'une des impulsions, modulé par une fonction périodique dont la distance entre maximums est liée à  $t_0$ , et donc à l'espacement des diffuseurs.

$$|S(\omega)| = \frac{|\sin N \omega t_0|}{|\sin \omega t_0|} |E(\omega)|$$

où  $\omega$  représente la pulsation.

Ainsi, caractériser le milieu étudié revient à extraire le spectre relatif à sa structure et à l'interpréter pour dégager les paramètres principaux de la distribution des diffuseurs.

## 2.2. ANALYSE CEPSTRALE

L'analyse cepstrale est née ces dernières années aux États-Unis sous l'impulsion d'une équipe de chercheurs (A. V. Oppenheim, R. W. Schafer et J. L. Cadwell) [5, 6]. Cet opérateur non linéaire transforme un produit de convolution en somme et permet de résoudre, dans certaines conditions, des problèmes de convolution. Ses propriétés sont particulièrement intéressantes pour l'analyse d'un signal constitué d'une somme d'échos ainsi que la caractérisation de ceux-ci.

Si l'on suppose que l'onde ultrasonore en mode A est le résultat de la convolution d'une impulsion avec un ensemble de réflecteurs (et avec bon nombre d'autres phénomènes définis dans le modèle de convolution), il est intéressant d'examiner tout d'abord le spectre des composantes de cette convolution.

Le spectre d'une impulsion typique a un aspect régulier avec un maximum correspondant à la fréquence centrale du transducteur. L'ensemble des diffuseurs possède un spectre en dent de scie avec de nombreux pics représentatifs des phénomènes d'interférences apparaissant dans la structure. Le spectre de la ligne échographique sera donc le produit de ces deux spectres.

La méthode d'analyse cepstrale consiste à prendre le logarithme du spectre de cette convolution, ce qui conduit à la somme de deux spectres logarithmiques, l'un lisse et l'autre en dent de scie. Il est alors possible de corriger le spectre logarithmique de la structure en retranchant celui de la réponse du transducteur.

On prend ensuite la transformée de Fourier inverse de cette somme, ce qui donne une représentation temporelle dite cepstre complexe qui fournit des informations sur les espacements et les périodicités dans le milieu. L'emplacement des maximums dans le cepstre apporte une mesure sur l'espacement moyen des diffuseurs.

La notion de cepstre de puissance provient de la définition du cepstre complexe, c'est une version simplifiée dans laquelle l'information de phase est perdue. Nous présentons ici le cepstre de puissance échantillonné car l'opération d'échantillonnage est indispensable lorsque l'on veut utiliser le calcul numérique.

Soit  $a(t)$  un signal résultant de la convolution de  $f(t)$  et de  $g(t)$  nous avons alors :

$$a(nT) = f(nT) * g(nT)$$

où  $T$  représente la période d'échantillonnage, donc :

$$a_n = \sum_p f_p g_{n-p} = \sum_p f_{n-p} g_p$$

Soit  $A(z)$  la transformée en  $z$  de  $a_n$ . On peut écrire :

$$A(z) = \sum_n a_n z^{-n}$$

et donc :

$$A(z) = F(z) G(z)$$

dans le domaine de convergence commun, où  $F(Z)$  et  $G(Z)$  sont les transformées de  $f_n$  et  $g_n$ .

L'opérateur Log permet de transformer ce produit en somme.

$$\text{Log}(F(Z) \cdot G(Z)) = \text{Log}(F(Z)) + \text{Log}(G(Z))$$

L'on démontre (5) que cette égalité n'est strictement vraie en complexe que si l'expression analytique prise pour la définition du Log se traduit par la formule :

$$\begin{aligned} \text{Log } F(\rho e^{j\varphi}) &= \int_0^\varphi \frac{\partial F(\rho e^{jv})}{\partial v F(\rho e^{jv})} dv + \text{Log} |F(\rho)| + j |\text{Arg } \pi F(\rho)| \end{aligned}$$

Pour simplifier les calculs, on n'utilise que le module de la transformée de Fourier de  $f_n$  dans le calcul du Log. Puis une transformée de Fourier inverse permet d'obtenir un résultat de même nature que les données. Nous arrivons donc à la représentation symbolique suivante du cepstre de puissance :



### 2.3. ANALYSE SPECTRALE

L'introduction de l'analyse spectrale permet elle aussi de caractériser le spectre de la séquence d'échos obtenus en réflexion et peut être réalisée grâce à deux grands types de méthodes.

La première consiste à faire la représentation de l'enveloppe de la fonction d'autocorrélation du signal réfléchi. Cette méthode, par le biais de la détection des maximums dans le domaine temporel donne une information sur les périodicités principales dans le signal. Elle décrit la structure interne du signal en terme de taux de corrélation entre n'importe quel segment de l'onde et d'autres segments d'égale longueur situés à d'autres positions de la durée totale du signal.

La seconde méthode consiste à calculer la fonction d'autocorrélation de la densité spectrale de puissance du signal afin de faire ressortir la périodicité princi-

pale dans le spectre et donc l'espacement moyen entre les hétérogénéités. En effet, le premier pic à retard non nul (dans le domaine des fréquences) est représentatif de la périodicité principale dans le spectre. Cette représentation contient donc une information sur la structure du milieu : autrement dit, il dépend de la structure du spectre de puissance plutôt que de sa forme globale.

Le paragraphe suivant permet, à partir d'une simulation du signal obtenu en réflexion sur une structure périodique de caractériser l'ensemble des méthodes présentées ci-dessus.

### 3. Application des Modèles à une structure périodique théorique

Dans cette étude, la base de tous les traitements est constituée par un système d'acquisition de données réalisé par nos soins (fig. 1). La précision des traite-

SCHEMA BLOC

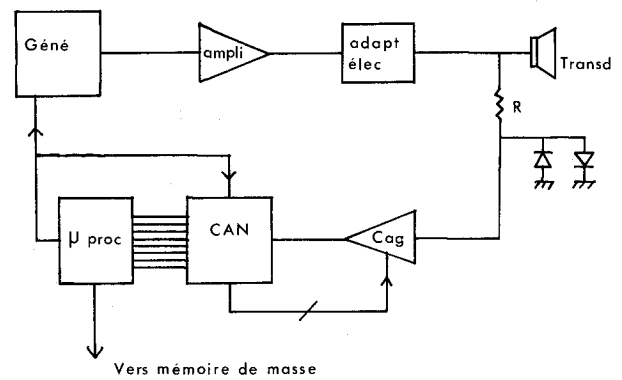


Fig. 1. — Montage expérimental : système d'acquisition de données.

ments numériques dépend de la qualité des paramètres de la chaîne de digitalisation. Un soin particulier a donc été apporté au choix de ces différents paramètres, permettant l'obtention de résultats reproductibles avec un minimum d'erreur. Ce système d'acquisition comprend :

- un système numérique de contrôle de gain permettant de compenser l'atténuation dans le milieu. Le convertisseur analogique numérique utilisé (DATEL) numérise le signal sur 6 bits à une fréquence d'échantillonnage maximale de 10 MHz;
- une mémoire tampon de 2048 octets permettant le stockage des données;
- un micro-ordinateur muni de disques souples comme mémoire de masse sur lesquels sont enregistrées les lignes échographiques décorréelées.

Les données sont ensuite transférées sur un IBM PC-AT pour le traitement.

#### 3.1. SIMULATION

Afin de simuler un signal échographique provenant de la réflexion sur un milieu stratifié, nous avons

procédé à l'enregistrement de la réflexion d'une impulsion électrique incidente de  $1 \mu\text{s}$  sur un bloc de laiton de  $5 \text{ cm}$  d'épaisseur placé dans l'eau. La réponse obtenue possède une durée de  $4 \mu\text{s}$  (fig. 2).

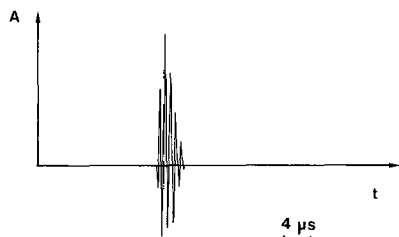


Fig. 2. — Réponse impulsionnelle de la sonde.

Puis nous avons reproduit cette impulsion à des intervalles périodiques avec une inversion de phase alternative pour simuler la réflexion à partir d'une structure périodique. La figure 3 représente le signal échographique simulé obtenu par réflexion sur deux structures périodiques enchevêtrées correspondant à des retards respectifs de  $6,4$  et  $5 \mu\text{s}$ . Dans ce cas, la nature périodique de chacune des deux structures n'est plus apparente à partir de la représentation temporelle du signal réfléchi. Le choix de périodicités proches l'une de l'autre permettra de caractériser la précision de chacune des méthodes proposées.

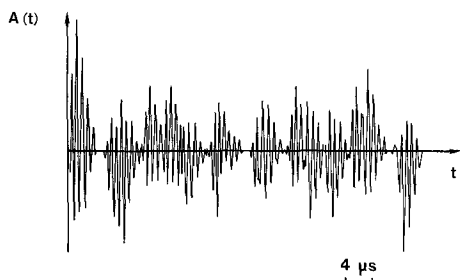


Fig. 3. — Simulation du signal échographique obtenu par réflexion sur deux structures périodiques ( $6,4$  et  $5 \mu\text{s}$ ).

Les méthodes relatives à l'analyse spectrale ne permettent pas la séparation des deux informations sur les périodicités. En effet, la représentation de la fonction d'autocorrélation de la densité spectrale de puissance (fig. 4) du signal simulé présente un maximum pour une fréquence correspondante à un retard de l'ordre de  $5 \mu\text{s}$  : la largeur de ce maximum ne permet pas de discerner la seconde périodicité de  $6,4 \mu\text{s}$  qui reste

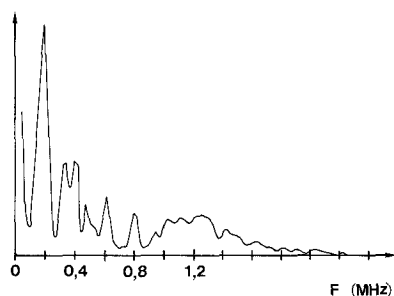


Fig. 4. — Fonction d'autocorrélation de la densité spectrale de puissance.

cachée. Dans chacune des représentations utilisées ici, les ordonnées sont choisies arbitrairement et les premiers points des courbes ne sont pas représentés afin d'obtenir un facteur d'échelle permettant une meilleure visualisation des résultats.

La méthode de l'enveloppe de la fonction d'autocorrélation du signal (fig. 5 a) ne permet pas elle non plus, la séparation des deux informations. Par contre, elle présente un intérêt car elle fournit une représentation temporelle plus aisée à interpréter dans le cas de fortes valeurs d'espacement moyen donc de retard. Ainsi pour ces méthodes spectrales, les deux maximums liés à chacune des périodicités se trouvent dans un seul et même pic, dont la largeur dépend de la réponse impulsionnelle du transducteur. C'est pourquoi on tente, grâce à la méthode d'analyse cepstrale, d'isoler le cepstre lié aux diffuseurs de celui lié à la réponse du système.

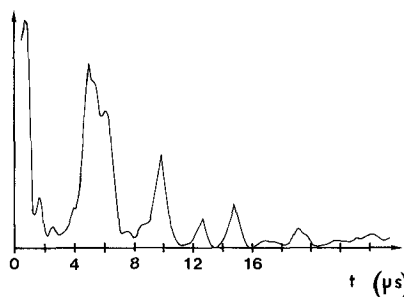


Fig. 5 a) Enveloppe de la fonction d'autocorrélation du signal.

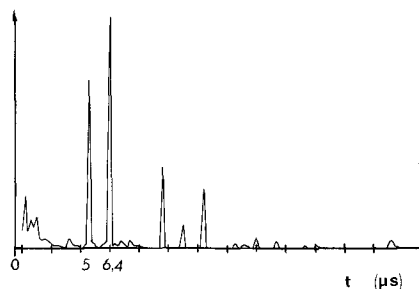


Fig. 5 b) Cepstre de puissance.

Ainsi la représentation de la méthode d'analyse cepstrale (fig. 5 b) permet bien de dégager les informations sur les deux structures périodiques, dont les pics représentatifs se trouvent particulièrement à  $6,4$  et  $5 \mu\text{s}$ . La représentation du cepstre de la réponse du système montre qu'il possède ses composantes principales près de l'origine à des retards faibles par rapport aux informations liées à la structure, ce qui permet bien d'effectuer une déconvolution.

### 3.2. MILIEU RÉEL

Nous avons réalisé une structure périodique unidimensionnelle constituée de fils de cuivre de  $100 \mu\text{m}$  juxtaposés et séparés de  $2,54 \text{ mm}$ , afin de comparer les deux méthodes sur un milieu réel.

La figure 6 a représentant l'enveloppe de la fonction d'autocorrélation du signal rétrodiffusé présente un maximum à  $3,5 \mu\text{s}$  correspondant un espacement moyen de  $2,62 \text{ mm}$ . La représentation du cepstre de

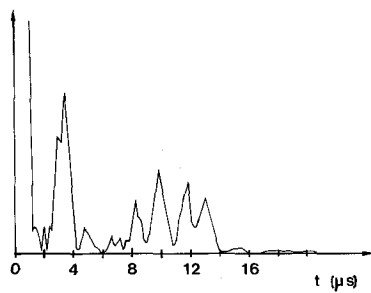


Fig. 6 a) Enveloppe de la fonction d'autocorrélation.

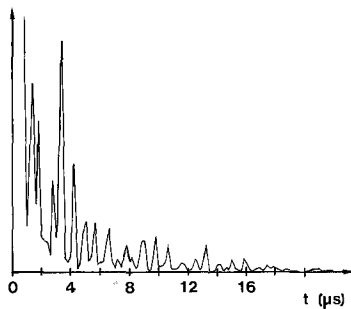


Fig. 6 a) Cepstre de puissance.

puissance du même signal (fig. 6 b) présente un maximum plus fin à 3,4  $\mu\text{s}$  correspondant à un espacement de 2,55 mm.

En conclusion, ces travaux nous ont permis de caractériser la précision des méthodes proposées et mettent en évidence l'intérêt de l'analyse cepstrale dans le cadre de la caractérisation ultrasonore des milieux hétérogènes. Afin de confronter l'ensemble des résultats obtenus avec un milieu à trois dimensions, nous avons utilisé un milieu réel constitué de billes (représentant les diffuseurs) noyées dans l'eau. L'ensemble des résultats obtenus est représenté dans le paragraphe suivant.

#### 4. Application des méthodes sur le cas expérimental

##### 4.1. ANALYSE

Pour les expériences, nous avons cherché un milieu hétérogène commode permettant en particulier des modifications du pourcentage volumique des diffuseurs et de la distance de propagation. Une suspension d'un solide dans un liquide présente ces avantages. Le polystyrène ayant une densité proche de l'unité, nous avons donc choisi une suspension dans l'eau de sphères de polystyrène d'un diamètre compris entre 0,8 et 1 mm. Une légère agitation du mélange permet d'éviter la formation d'agrégats et la sédimentation. La faible atténuation de l'eau et le diamètre des billes choisies permettent des expériences à des fréquences centrées autour de 1 MHz.

Le signal rétrodiffusé en mode A, recueilli par le transducteur a été obtenu à l'aide du système d'acquisition défini ci-dessus.

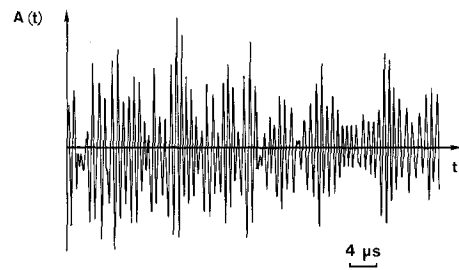


Fig. 7. - Signal rétrodiffusés  $s(t)$  par les billes plongées dans l'eau (pourcentage volumique de 2 %).

Nous avons relevé le signal rétrodiffusé par les diffuseurs (fig. 7) pour une impulsion comportant une période de sinusoïde de durée 1  $\mu\text{s}$  et un pourcentage volumique de billes de 2 %. L'acquisition du signal s'effectue sur une durée de 200  $\mu\text{s}$  correspondant à une exploration du milieu de l'ordre de 15 cm. L'analyse spectrale est effectuée sur une portion du signal correspondant à une fenêtre temporelle de 512 points qui, pour une fréquence d'échantillonnage de 10 MHz représente une durée de 51,2  $\mu\text{s}$ . L'utilisation d'une fenêtre de Hamming élimine les problèmes engendrés par la discontinuité aux frontières de la fenêtre rectangulaire, à savoir l'adjonction de composantes hautes fréquences au spectre estimé du signal.

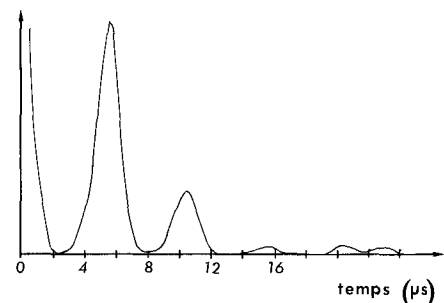


Fig. 8. - Enveloppe de la fonction d'autocorrélation de  $s(t)$ .

La figure 8 représente l'enveloppe de la fonction d'autocorrélation du signal temporel qui présente un maximum pour un retard de 5,6  $\mu\text{s}$  correspondant à un espacement moyen de 4,2 mm.

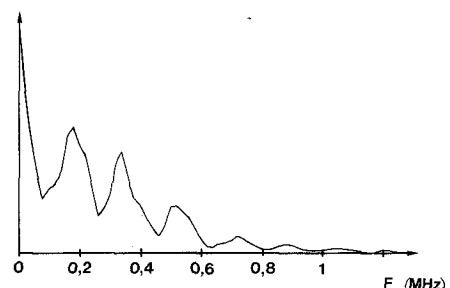


Fig. 9. - Autocorrélation de la densité spectrale de  $s(t)$ .

La représentation de l'autocorrélation du spectre du signal échographique (fig. 9) présente un pic, pour un décalage fréquentiel de 275,77 KHz correspondant à une périodicité majeure dans le spectre. Cette

périodicité est donc associée à un libre parcours moyen de 4,26 mm entre chacune des billes pour une distribution quasi homogène de l'ensemble des diffuseurs.

L'analyse cepstrale fournit elle un résultat beaucoup plus intéressant (fig. 10). En effet, on retrouve le pic important de l'enveloppe de l'autocorrélation du signal temporel au retard 5,8  $\mu$ s mais dont la largeur est débarrassée de la réponse impulsionnelle du système. La valeur du retard du pic obtenu correspond à un espacement moyen de 4,35 mm. Il est à noter que l'on retrouve des pics à des multiples du retard du premier maximum qui ne sont pas à interpréter comme d'autres structures intervenant dans la distribution des billes.

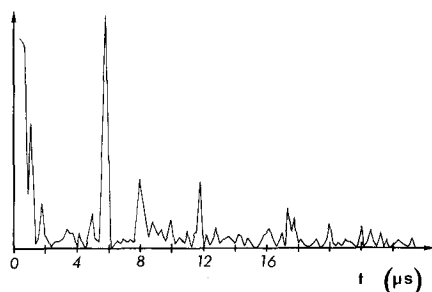


Fig. 10. — Cepstre de puissance de  $s(t)$ .

#### 4.2. INTERPRÉTATION

L'analyse spectrale fait apparaître des résonances (pics de la DSP) qui sont interprétées à partir de leur périodicité qui fournit une information sur le libre parcours moyen entre deux hétérogénéités. Les mesures effectuées sont en accord avec une détermination théorique de ce libre parcours obtenu à partir d'un modèle de structure cubique centrée donnant une valeur de 3,18 mm pour un pourcentage volumique de billes de l'ordre de 2%. L'écart entre les valeurs obtenues expérimentalement et la théorie provient de la difficulté d'éviter la sédimentation des billes, phénomène qui impose une diminution du pourcentage volumique des billes réellement en suspension et donc une augmentation du libre parcours moyen réel entre les billes.

L'analyse cepstrale fournit un résultat en accord avec les techniques d'analyse spectrale, mais libère le résultat des problèmes liés à la réponse du système. Elle fournit une information sur la largeur du maximum et fait apparaître de nouvelles informations sur des structures secondaires existants dans le milieu comme l'indique l'existence d'un pic à 8  $\mu$ s qui ne peut être interprété comme un multiple d'un pic existant.

## 5. Conclusion

L'introduction des techniques de traitement du signal dans la caractérisation ultrasonore des milieux hétérogènes, donne l'accès à des informations caractéristiques de la structure de ces milieux. Ainsi les méthodes d'analyse spectrale et cepstrale fournissent des mesures de l'espacement moyen dans des cas de faibles pourcentages volumiques hétérogénéités.

La suite apportée à ce travail sera basée sur l'interprétation de la largeur des pics obtenus, et des pics multiples présents dans la représentation du cepstre complexe. Ces résultats doivent déboucher sur l'étude des milieux hétérogènes à fort pourcentage volumique d'hétérogénéités tels que les bétons en vue de l'obtention d'une image-signature de ceux-ci.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées pour l'aide matérielle apportée à ces travaux, et spécialement M. Caussignac pour les échanges intéressants qu'ils ont eus avec lui.

Manuscrit reçu le 27 janvier 1987.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. GAZALET, J. FROHLY, J. PERDIGAO et C. BRUNEEL, Incoherent ultrasonic wave attenuation in homogeneous media, *J. Acoust. Soc. Am.*, 76, Oct. 1984, p. 1259-1261.
- [2] J. PERDIGAO, Optimisation du contrôle par ultrasons des milieux hétérogènes, *Thèse de 3<sup>e</sup> cycle*, juillet 1984, Valenciennes.
- [3] J. P. JONES et S. LEEMAN, Ultrasonic tissue characterization and quantitative ultrasound scatter imaging: methods and approaches, *IEEE Pub.*, CH 1751-7, 1982, p. 247-258.
- [4] M. FINK et F. HOTTIER, Short time Fourier analysis and diffraction effect in biological tissue characterization, *Acoustical imaging*, 12, 1982, p. 493-503.
- [5] A. V. OPPEINHEIM, A speech analysis-synthesis system based on homomorphic filtering, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 45, Feb. 1969, p. 458-465.
- [6] A. V. OPPEINHEIM, R. W. SCHAFER et T. G. STOCKMAN, Non linear filtering on multiplied and convolved signals, *Proceeding of the IEE*, 56, n° 8, August 1968.