



**HAL**  
open science

## Effet de déperiodisation dans une structure multicouche plane viscoélastique: expérience et simulation

Pierre Marechal, Olivier Lenoir

► **To cite this version:**

Pierre Marechal, Olivier Lenoir. Effet de déperiodisation dans une structure multicouche plane viscoélastique: expérience et simulation. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00541707

**HAL Id: hal-00541707**

**<https://hal.science/hal-00541707>**

Submitted on 1 Dec 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# 10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

## Effets de déperiodisation dans une structure multicouche plane viscoélastique : expérience et simulation.

P. Maréchal, O. Lenoir

LOMC FRE CNRS 3102, FANO FR CNRS 3110, Université du Havre, Place Robert Schuman, 76610 Le Havre, France

Les travaux présentés concernent la comparaison des tracés théoriques et expérimentaux des coefficients de réflexion et de transmission d'une multicouche plane périodique composée de  $N$  périodes ( $1 < N < 5$ ), dans le domaine de fréquences 0,5-3,5 MHz. La période est constituée de deux plaques collées, l'une en aluminium, l'autre en polyéthylène. Ces matériaux, supposés isotropes, présentent un fort contraste d'impédance. L'atténuation des ondes longitudinales et transversales est prise en compte pour le polyéthylène et négligée pour l'aluminium. Théoriquement, les coefficients de réflexion et de transmission sont obtenus par la méthode de la matrice des rigidités élaborée par Rokhlin et *al.*. Dans ce calcul, les plaques sont supposées en contact parfait, la présence de la colle étant négligée. On montre théoriquement que, suivant le côté d'insonation, les tracés des coefficients de réflexion sont différents et ceux des coefficients de transmission sont identiques. Ces résultats sont vérifiés expérimentalement. On constate par ailleurs que la prise en compte de l'atténuation atténue la formation de bandes d'arrêt sur les différents coefficients. Les courbes de dispersion théoriques et expérimentales sont comparées pour différentes valeurs de  $N$  (nombre de périodes). Enfin, l'importance de la précision et de la régularité des propriétés acoustiques et géométriques des plaques constituant une période est discutée ; une déperiodisation même légère peut influencer fortement sur l'allure des tracés.

### 1 Introduction

L'objet de cette étude est de comparer les coefficients de réflexion d'une multicouche plane périodique comprenant  $N$  périodes ( $1 < N < 5$ ) obtenus par simulation, pour des angles d'incidence variant entre  $0^\circ$  et  $30^\circ$ , avec les spectres en réflexion normés relevés expérimentalement. La période est constituée de deux plaques collées, l'une en aluminium, l'autre en polyéthylène, de même épaisseur, présentant un fort contraste d'impédance acoustique. Les caractéristiques géométriques et physiques des plaques sont prises en compte pour déterminer les spectres de réflexion de la structure périodique étudiée.

Dans le modèle choisi, les plaques sont supposées en contact parfait, la couche de colle étant estimée négligeable. De plus, seules les atténuations des ondes longitudinales et transversales dans le polyéthylène sont prises en compte. Les études numériques montrent que les modules des coefficients de réflexion diffèrent suivant le côté d'insonation, soit côté aluminium ou polyéthylène. Ces résultats sont confirmés expérimentalement. Cependant, il s'est avéré au cours des études expérimentales que la fabrication de structures rigoureusement périodiques posait de nombreux problèmes. En effet, des plaques de 20 cm de hauteur et de 30 cm de largeur découpées dans un produit brut de  $1 \text{ m}^2$  ont des épaisseurs sur lesquelles l'incertitude peut atteindre 10%. Il faut donc tenir compte de ces déperiodisations dans le modèle théorique.

Dans une première partie, les bases théoriques du modèle sont décrites. Dans la seconde partie sont présentés les signaux temporels réfléchis suivant le côté d'insonation, puis après FFT et traitement les spectres de réflexion pour différents angles d'incidence.

### 2 Base théorique

On considère un empilement de  $N$  périodes, chacune constituée d'une plaque d'aluminium et d'une plaque de polyéthylène. Une onde plane monochromatique est envoyée sur la multicouche en faisant un angle  $\theta$  par rapport à la normale aux plaques. On note  $R_1$  (réflexion directe) le coefficient de réflexion quand l'onde incidente insonne une plaque d'aluminium en premier et  $R_2$  (réflexion inverse) celui obtenu quand la première plaque insonnée est en polyéthylène. Ces coefficients sont obtenus à partir d'une procédure récursive proposée par Rokhlin et *al.* [1-2]. Pour chaque période  $n$ , on définit une matrice des flexibilités ( $4 \times 4$ ) :

$$s^n = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix}_n \quad (1)$$

où les matrices  $s_{ij}$  sont des sous-matrices  $2 \times 2$ .

Les sous-matrices  $s_{ij}$  pour le bloc  $N$  sont déterminées à partir de celles du bloc  $(N-1)$  précédent, en prenant en compte celles du bloc  $n$  considéré :

$$\begin{cases} s_{11}^N = s_{11}^{N-1} + s_{12}^{N-1} (s_{11}^n - s_{22}^{N-1})^{-1} s_{21}^{N-1} \\ s_{12}^N = -s_{12}^{N-1} (s_{11}^n - s_{22}^{N-1})^{-1} s_{12}^n \\ s_{21}^N = s_{21}^n (s_{11}^n - s_{22}^{N-1})^{-1} s_{21}^{N-1} \\ s_{22}^N = s_{22}^n - s_{21}^n (s_{11}^n - s_{22}^{N-1})^{-1} s_{21}^n \end{cases} \quad (2)$$

On montre que les expressions des coefficients de réflexion  $R_{1,2}$  s'expriment en fonction des éléments (exposants) de sous-matrices (indices) de la matrice globale des flexibilités  $s^N$  :

$$R_1 = \frac{(s_{11}^{22} - iy_F)(s_{22}^{22} - iy_F) + (s_{12}^{22})^2}{(s_{11}^{22} + iy_F)(s_{22}^{22} - iy_F) + (s_{12}^{22})^2}, \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{(s_{11}^{22} + iy_F)(s_{22}^{22} + iy_F) + (s_{12}^{22})^2}{(s_{11}^{22} + iy_F)(s_{22}^{22} - iy_F) + (s_{12}^{22})^2}, \quad (4)$$

où  $y_F = -\frac{\cos\theta}{\rho_F c_F \omega}$ , avec  $\theta$  l'angle d'incidence,  $\rho_F$  la

masse volumique et  $c_F$  la vitesse des ondes dans le fluide.

Dans l'hypothèse de matrices de souplesse purement réelles, on montre par ailleurs que  $R_2 = R_1^*$ .

### 3 Résultats expérimentaux

#### 3.1 Dispositif expérimental

La structure multicouche étudiée est immergée dans un aquarium rempli d'eau (Figure 1). Les transducteurs utilisés ont une fréquence centrale  $f_0 = 2,25$  MHz. Les bandes passantes ont été mesurées en incidence normale à mi-hauteur  $BP_6 = 78\%$  et à  $-20$  dB  $BP_{20} = 164\%$ , ce qui permet de déterminer le coefficient de réflexion sur une large gamme de fréquence, typiquement jusqu'à 4 MHz. L'un des transducteurs est utilisé en émission, le second en réception, respectivement avec un angle d'incidence et de réception  $\theta$  réglable de 0 à 30° [3].

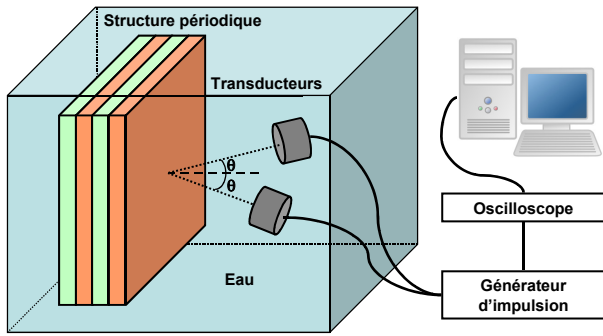


Figure 1 : Dispositif expérimental.

Les propriétés des plaques (Table 1) constituant la structure périodique ont été évaluées sur 4 échantillons et l'épaisseur de résine époxy a été évaluée, puis négligée. Les plaques de 20 cm de hauteur et de 30 cm de largeur découpées dans un produit brut de 1 m<sup>2</sup> dont l'incertitude sur les épaisseurs peut atteindre 10%.

Milieu	Z (MRa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_L$ (m/s)	$C_T$ (m/s)	d (mm)
Aluminium	17,9	2800	6380	3100	4
Polyéthylène	2,22	940	2370	1200	4
Eau	1,47	1000	1470	–	–

Z : impédance acoustique ;  $\rho$  : masse volumique ;  $C_L$  : vitesse longitudinale ;  $C_T$  : vitesse transverse ; d : épaisseur.

Table 1 : Propriétés des matériaux constituants.

#### 3.2 Echo de réflexion

Les échos relevés pour différents angles d'incidence et de réception permettent d'illustrer les phénomènes de réflexion spéculaire et résonants (Figure 2). Pour un angle d'incidence/réception donné, l'amplitude du premier écho réfléchi est liée à ses propriétés acoustiques ; la multitude des échos qui suivent est liée au rapport entre la longueur d'onde et l'épaisseur de la couche d'incidence. Ces échos

sont attribuables à des réflexions multiples à l'intérieur de la multicouche et de ses différentes composantes. Plus la coda dure longtemps, plus le signal est qualifié de résonant.

Sur le signal réfléchi par la période (PE/Al), on observe un écho spéculaire sur la plaque de polyéthylène, un second sur la plaque d'aluminium, puis des échos de réflexion multiple. Sur le signal réfléchi par la période (Al/PE), seul un écho spéculaire sur la plaque est clairement identifiable. Les spectres de réflexion sont obtenus en calculant la FFT des signaux réfléchis.

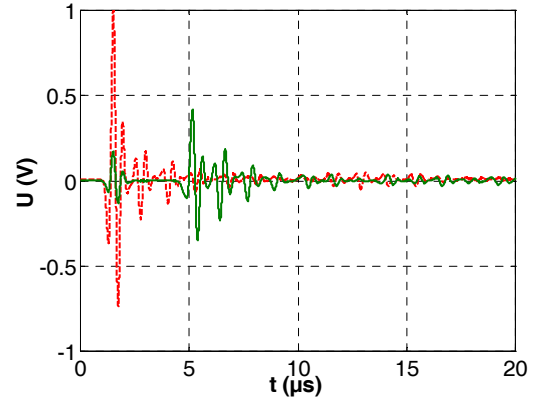


Figure 2 : Echos de réflexion en incidence normale  $\theta = 0^\circ$ , selon le côté d'insonation, direct (Al/PE)×5 (tiret rouge) ou inverse (PE/Al)×5 (continu vert).

#### 3.3 Spectres de réflexion

Un calcul sans pertes montre un spectre de réflexion  $|R|$  identique quel que soit le côté d'insonation : direct (Al/PE) ou inverse (PE/Al). Ce n'est pas le cas expérimentalement : lorsque les spectres de réflexion direct (Al/PE) ou inverse (PE/Al) sont comparés, on observe une différence significative (Figure 3). Ceci s'explique par le fait que la plaque de polyéthylène présente des résonances amorties. L'atténuation liée au matériau à la fréquence considérée autour de 2 MHz n'est pas négligeable et doit être prise en compte. Pour cela, on considère une atténuation dépendant linéairement de la fréquence :  $\alpha = \alpha_0 \cdot (f/f_0)$ , ce qui induit une composante imaginaire  $\delta_C$  constante sur la vitesse. Celle-ci a été évaluée par ajustements successifs à  $\delta_C = 1\%$  :

$$C_L = \Re\{C_L\} \cdot (1 + j \cdot \delta_C) \quad (5)$$

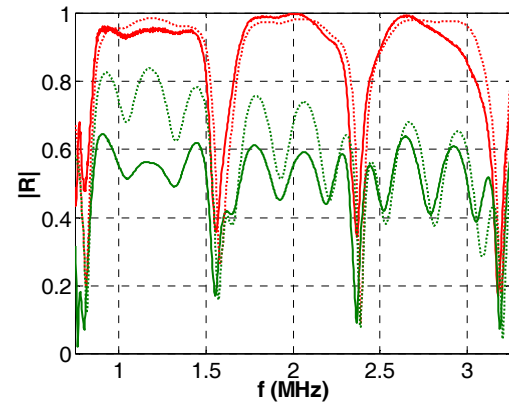


Figure 3 : Spectres de réflexion  $|R|$  théoriques (pointillé) et expérimentaux (continu) en incidence normale  $\theta = 0^\circ$ , selon le côté d'insonation, direct (Al/PE) (rouge) ou inverse (PE/Al) (vert).

Sur ces spectres de réflexion obtenus en incidence normale, on observe des positions des minima locaux marqués liés aux résonances dans l'épaisseur de la plaque d'aluminium  $\Delta f = C_L/(2.d) \approx 800$  kHz et d'autres plus atténués correspondent aux résonances dans l'épaisseur de la plaque de polyéthylène  $\Delta f \approx 300$  kHz [4].

Dans le cas d'une structure multicouche constituée de N périodes, du fait des incertitudes sur les épaisseurs et de la multiplicité des motifs élémentaires (Al/PE), le problème de la réelle périodicité de la structure se pose.

Comme l'illustre la Figure 4, les positions des minima locaux obtenus expérimentalement ne correspondent plus rigoureusement avec la théorie. Une observation des spectres de réflexion pour N = 1 à 5 périodes a été réalisée en incidence normale  $\theta = 0^\circ$ , et au-delà de N = 3 périodes, il n'y a plus d'évolution significative. Cependant, dans le cas sans atténuation, la théorie prévoit N résonances pour N périodes là où il n'en figure qu'une seule pour un motif élémentaire. Ceci n'est plus toujours identifiable aussi nettement à partir du moment où l'atténuation est prise en compte.

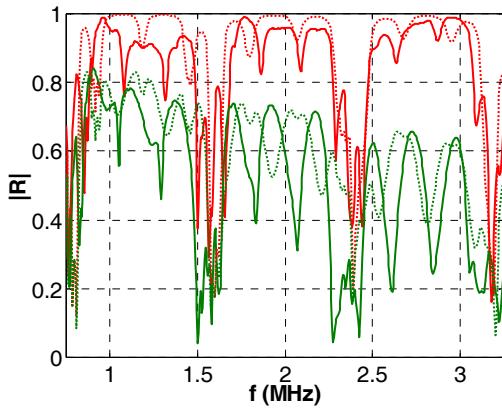


Figure 4 : Spectres de réflexion  $|R|$  théoriques (pointillé) et expérimentaux (continu) en incidence normale  $\theta = 0^\circ$ , selon le côté d'insonation, direct (Al/PE) $\times 5$  (rouge) ou inverse (PE/Al) $\times 5$  (vert).

Ce résultat expérimental, conforté par la théorie indique que l'atténuation joue un rôle important dans les propriétés de réflexion d'une structure périodique. En particulier, dans le cas d'une incidence normale (Figure 5), la fraction d'énergie qui atteint le motif suivant peut être partagée entre la transmission  $T_{AlPE}$  et l'atténuation  $A_{PE}$  estimée comme suit :

$$T_{AlPE} = T_{Al \rightarrow PE} T_{PE \rightarrow Al} = \frac{4Z_{Al}Z_{PE}}{(Z_{Al} + Z_{PE})^2} \approx 39\% \quad (6)$$

$$A_{PE} = e^{-\alpha d} = e^{-\frac{2\pi f_0 d \delta_C}{C_L}} \approx 79\% \quad (7)$$

Les effets cumulatifs de la transmission  $T_{AlPE}$  et l'atténuation  $A_{PE}$  sur un trajet aller-retour conduisent rapidement à une contribution négligeable d'un motif supplémentaire au-delà du deuxième motif :

$$T_{global} = (T_{EauAl})(T_{AlPE})^3 (A_{PE})^4 \approx 2\% \quad (8)$$

Une analyse plus poussée au moyen des séries de Debye [5] permettrait de quantifier plus précisément les contributions liées à chacun des motifs 1 à N.

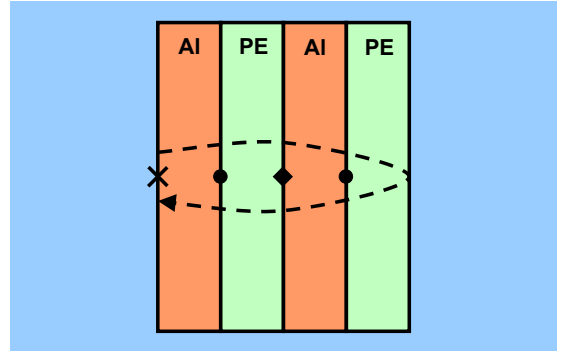


Figure 5 : Structure (Al/PE) $\times 3$  en incidence normale  $\theta = 0^\circ$ , et coefficients de transmission associés :  
( $\times$ )  $T_{EauAl}$ , ( $\bullet$ )  $T_{AlPE}$ , ( $\blacklozenge$ )  $T_{PEAl}$ .

### 3.4 Incidence oblique

La configuration précédente N = 5 périodes est maintenant étudiée en incidence oblique, ici avec  $\theta = 10^\circ$  (Figure 6.a) et  $20^\circ$  (Figure 6.b). La différence selon le côté d'insonation est marquée, et cette différence s'accroît à mesure que l'angle d'incidence augmente. L'accord entre expérience et théorie est vérifié dans le cas de l'insonation côté aluminium (Al/PE) $\times 5$  alors qu'elle ne concorde pas aussi bien côté polyéthylène (PE/Al) $\times 5$ , probablement du fait de l'incertitude sur l'évaluation des pertes.

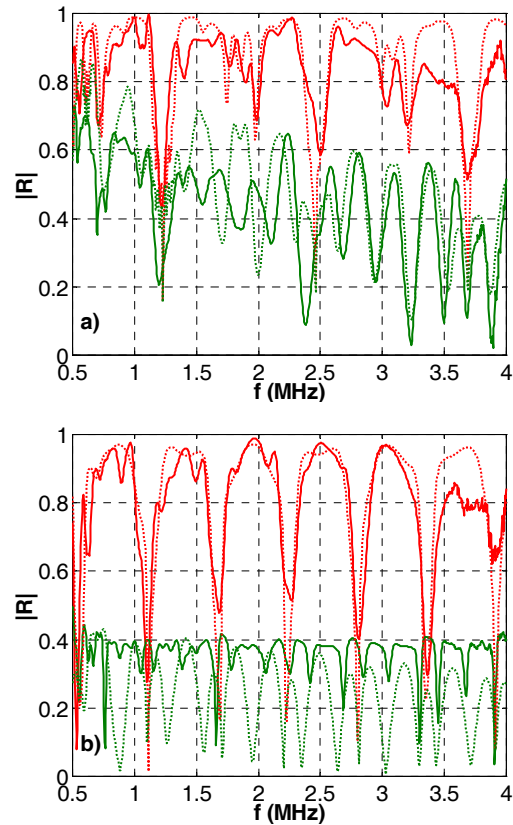


Figure 6 : Spectres de réflexion  $|R|$  théoriques (pointillé) et expérimentaux (continu) selon le côté d'insonation direct (Al/PE) $\times 5$  (rouge) ou inverse (PE/Al) $\times 5$  (vert), en incidence oblique a)  $\theta = 10^\circ$ , b)  $\theta = 20^\circ$ .

### 3.5 Courbes de dispersion

Le tracé du module du coefficient de réflexion  $|R|$  dans le plan fréquence/angle d'incidence, codé en niveaux de couleurs donne un bon aperçu des courbes de dispersion des modes se propageant dans la structure (Figure 7). Elles ont été comparées dans le cas de la configuration  $N = 5$  périodes selon le côté d'insonation direct (côté aluminium) ou inverse (côté polyéthylène). En particulier, on observe la démultiplication des courbes par rapport au cas du motif élémentaire. Un multicouche de  $N$  périodes implique  $N-1$  courbes à très basse fréquence associées à des modes dits verticaux [6-7]. De même, pour les autres paquets de  $N$  courbes, les unes correspondant à des ondes dans l'aluminium les autres dans le polyéthylène.

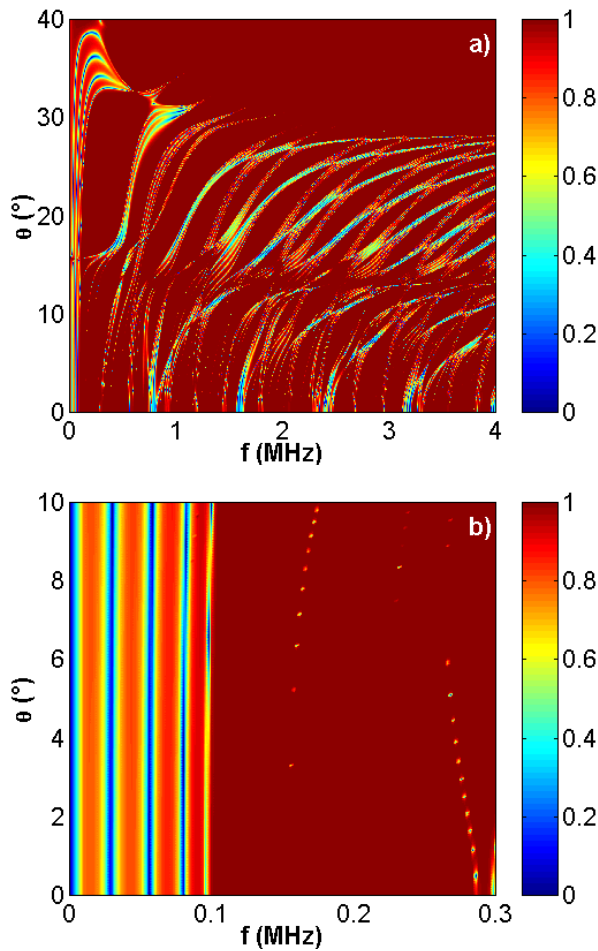


Figure 7 : Courbes théoriques de dispersion en réflexion  $|R|$  selon le côté d'insonation direct (Al/PE) $\times 5$  sans pertes a) de 0 à 4 MHz et b) des modes verticaux de 0 à 0,1 MHz.

Comme l'illustrent les Figures 7.a et 8, on peut relever les angles critiques de réfraction liés à l'aluminium ( $\theta_{L,Al} = 13,4^\circ$ ,  $\theta_{T,Al} = 28,5^\circ$ ), au polyéthylène ( $\theta_{L,PE} = 38,6^\circ$ ), au niveau des "paliers" que présentent les courbes de dispersion. En particulier, au-delà de l'angle critique lié au polyéthylène, pour  $f > 1$  MHz, la réflexion est totale.

Comme l'illustrent les courbes de dispersion sans pertes, les résonances observées (Figure 7.a) sont très étroites. Dans le cas où les pertes sont prises en compte (Figure 8), l'allure générale des courbes de dispersion est semblable, mais celles qui étaient voisines ont "fusionné" en une seule résonance élargie, et parfois fortement atténuée. La réflexion relevée côté aluminium (Figure 8.a) montre que les courbes de dispersion dans l'aluminium sont plus clairement identifiables.

De plus, le premier angle critique dans l'aluminium est observable ; au-delà de  $30^\circ$ , les ondes dans le polyéthylène ne sont plus visibles, car devenues évanescentes.

Les résonances liées à la plaque de polyéthylène sont nettement plus visibles avec une insonation côté polyéthylène (Figure 8.b). Il existe donc des différences notables entre les spectres de réflexion théorique sans pertes et ceux avec pertes, l'effet de ces dernières étant davantage marqué dans le cas de l'insonation côté polyéthylène (Figure 8.b), car l'onde incidente est fortement atténuée dès la première couche. Par ailleurs, en particulier en incidence normale, c'est aussi sur cette figure que l'on observe le plus nettement l'effet croissant des pertes avec la fréquence.

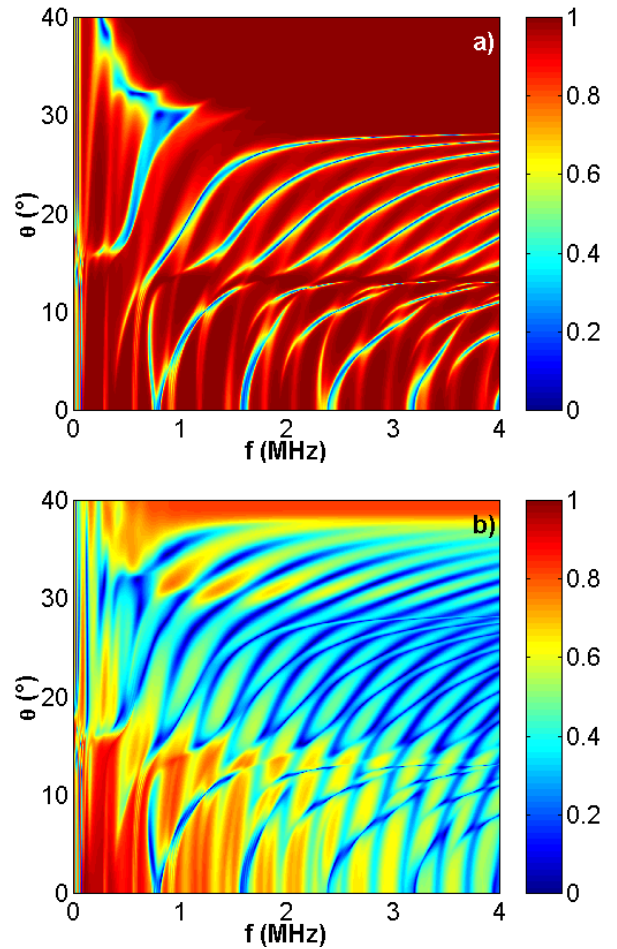


Figure 8 : Courbes théoriques de dispersion en réflexion  $|R|$  avec  $\delta_c = 1\%$  selon le côté d'insonation a) direct (Al/PE) $\times 5$  et b) inverse (PE/Al) $\times 5$ .

Une comparaison plus systématique des minima observés sur les courbes de réflexion en fonction de l'angle d'incidence (Figure 9) indique une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et théoriques (Figure 8.a), aux incertitudes près. En effet, les écarts entre expérience et théorie sont expliqués d'une part par les incertitudes sur les épaisseurs des plaques constituant la structure multicouche, ce qui implique des variations de fréquence estimées avec une erreur  $\Delta f \approx \pm 50$  kHz, et d'autre part par l'incertitude sur le positionnement angulaire avec  $\Delta \theta \approx \pm 0,5^\circ$ .

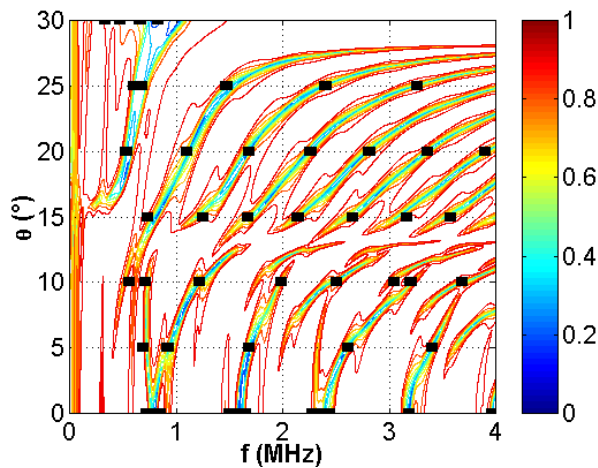


Figure 9 : Courbes théoriques de dispersion en réflexion  $|R|$  en insonation directe  $(AI/PE) \times 5$ , avec  $\delta_c = 1\%$  et superposition des positions des minima expérimentaux.

## 4 Discussion

Les résultats obtenus expérimentalement montrent l'importance qui doit être accordée à la caractérisation viscoélastique des matériaux utilisés pour la structure multicouche. En effet, le fait que l'atténuation dans une plaque de polyéthylène ait une importance comparable au coefficient de transmission  $T_{AI/PE}$  (équations (6) et (7)) vient modifier sensiblement les allures des courbes attendues. Selon le côté d'insonation, les résultats en termes de spectres de réflexion sont totalement différents, dès le premier motif (Figure 3). Il a aussi été mis en évidence que l'allure des spectres de réflexion n'évolue plus et ce dès un nombre de périodes  $N$  supérieur ou égal à 3 (Figure 4). Enfin, les incertitudes quant aux épaisseurs des plaques sont de l'ordre du dixième de millimètre. Cette relative imprécision de l'ordre de 5% conduit à des positions des minima de réflexion variables, et à des combinaisons de plaques d'épaisseur variable quasi-infinies à prendre en compte dans le modèle.

## 5 Conclusion

Dans cette étude, les propriétés de réflexion selon le côté d'insonation ont été mises en évidence. En effet, les propriétés viscoélastiques de matériaux tels que le polyéthylène doivent être prises en compte afin d'expliquer les phénomènes physiques observés. Ainsi, il a été montré expérimentalement et vérifié théoriquement que les pertes avaient une influence significative, aussi bien en termes d'amplitude que d'existence ou de position des minima de réflexion.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier H. Cahingt pour la réalisation des assemblages multicouches et F. Duhamel pour la partie expérimentale.

## Références

- [1] Rokhlin S.I., Wang L., "Stable recursive algorithm for elastic wave propagation in layered anisotropic media: Stiffness matrix method", *J. Acoust. Soc. Am.* 112 (3), 822–834 (2002).
- [2] Wang L., Rokhlin S.I., "Stable reformulation of transfer matrix method for wave propagation in layered anisotropic media", *Ultrasonics* 39 (6), 413-424 (2001).
- [3] Lenoir O., Izbicki J.L., Rembert P., Maze G., Ripoche J., "Acoustic scattering from an immersed plane multilayer: Application to the inverse problem", *J. Acoust. Soc. Am.* 91 (2), 601-612 (1992).
- [4] Lenoir O., Maréchal P., "Study of plane periodic multilayered viscoelastic media: Experiment and simulation", *IEEE Int. Ultrason. Symp.*, Roma, September 20-23, (2009).
- [5] Maréchal P., Haumesser L., Tran-Huu-Hue L.P., Holc J., Kuščer D., Lethiecq M., Feuillard G., "Modeling of a high frequency ultrasonic transducer using periodic structures", *Ultrasonics* 48 (2), 141-149 (2008).
- [6] Lenoir O., Izbicki J.L., Rousseau M., Coulouvat F., "Subwavelength ultrasonic measurement of a very thin fluid layer thickness in a trilayer", *Ultrasonics* 35 (7), 509-515 (1997).
- [7] Coulouvat F., Rousseau M., Lenoir O., Izbicki J.L., "Lamb-type waves in symmetric solid-fluid-solid trilayer", *Acta Acustica* 84 (1), 12-20 (1998).