

NEUVIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 20 MAI 1983

SPECTRES ACOUSTIQUES DE TUBES ELASTIQUES PLONGES DANS L'EAU
ACOUSTIC SPECTRA OF ELASTIC CYLINDRICAL SHELLS IMMersed IN WATER

Gérard MAZE et Jean RIPOCHE

Laboratoire d'Electronique et d'Automatique, groupe "ULTRASONS"
U.E.R.S.T., B.P. 4006, 76077, LE HAVRE

RESUME

L'étude de la diffusion d'une onde ultrasonore par un cylindre élastique plongé dans l'eau montre l'existence de nombreuses résonances qui sont attribuées à la propagation d'ondes circonférentielles du type Rayleigh ou du type "Galerie à écho". Ces ondes qui sont générées sur le cylindre se propagent dans les deux sens de rotation. Pour certaines fréquences, elles forment des ondes stationnaires sur la circonférence du cylindre. Le cylindre absorbe alors de l'énergie qui s'accumule dans l'onde stationnaire. Si l'excitation forcée cesse, l'énergie accumulée est réémise dans le milieu liquide suivant des directions privilégiées correspondant aux ventres de vibration, et ceci, d'autant plus progressivement que l'onde a un pouvoir de réémission faible. Ce phénomène se traduit sur l'écho rétrodiffusé par la variation brutale de l'amplitude du signal lors du régime forcé et par la présence d'un régime de réémission libre décroissant en fonction du temps après la fin de l'excitation forcée.

La Méthode d'Isolement et d'Identification des Résonances (M.I.I.R.), mise au point au laboratoire, permet d'enregistrer la réémission libre du cylindre pour les différentes résonances en fonction de la fréquence réduite ka . Le spectre de résonances ainsi obtenu est une caractéristique de la structure et du constituant du cylindre.

Nous comparons, dans ce travail, les spectres de trois tubes de même structure mais de constituant différent (aluminium, cuivre, PVC). Nous étudions les séries de résonances et leur influence sur le spectre de rétrodiffusion obtenu pendant le régime permanent.

SUMMARY

The acoustic scattering by an elastic cylinder immersed in water shows the existence of many resonances caused by circumferential waves: Rayleigh and Whispering Gallery waves. These waves, generated on the cylinder are propagated in two opposite directions. For a particular frequency, they form standing waves on the circumference of the cylinder. The cylinder stores energy in the standing waves. If the forced excitation stops, the stored energy is radiated in particular directions in the surrounding fluid from the antinodes of the vibration all the more gradually as the wave has a small "attenuation" coefficient.

When the steady state response is examined as function of the frequency, the backscattered spectrum shows abrupt variations; when the transient response is examined just after the end of the forced vibration, a quasi-linear spectrum is observed.

The "Resonance Isolation and Identification Method" (R.I.I.M.), used by the authors, gives the possibility to study the free vibration of the cylinder as function of frequency ka . The R.I.I.M. gives a quasi-linear resonance spectrum, but also the modes n . This resonance spectrum characterises the cylinder.

In this paper, the authors compare the spectra of three cylindrical shells having the same size but a different material composition (aluminum, copper, PVC).



SPECTRES ACOUSTIQUES DE TUBES ELASTIQUES PLONGES DANS L'EAU
ACOUSTIC SPECTRA OF ELASTIC CYLINDRICAL SHELLS IMMERSED IN WATER

INTRODUCTION

L'étude théorique de la diffusion d'une onde ultrasonore plane par un cylindre élastique est décrite par de nombreux auteurs [1-4]. Elle se traduit par le calcul de la fonction de forme en champ lointain. Celle-ci est proportionnelle à la pression acoustique et dépend, entre autres, de deux variables: la fréquence réduite ka (k nombre d'onde acoustique dans l'eau, a rayon du cylindre) et de l'angle azimutal φ . Deux études sont possibles l'une en faisant varier la fréquence réduite ka pour différentes valeurs du paramètre φ (angle azimutal), l'autre en faisant varier l'angle azimutal φ pour différentes valeurs du paramètre ka .

Des mesures expérimentales [5-7] ont permis de comparer la fonction de forme en champ lointain, calculée, pour un angle azimutal φ constant ($\varphi = 180^\circ$), en fonction de la fréquence réduite, avec la pression rétrodiffusée. L'accord entre les courbes théoriques et expérimentales est remarquable. Depuis, différents auteurs se sont attachés à analyser la structure complexe de ces courbes [8-10]. Cette structure est liée à la génération d'ondes circonférentielles qui ont pour support le cylindre élastique et qui se propagent en formant pour certaines fréquences, des ondes stationnaires sur la circonférence, faisant apparaître ainsi des résonances. L'application du formalisme de la matrice-S [11,12] a permis de caractériser parfaitement ces résonances et d'expliquer la forme de la courbe de rétrodiffusion au voisinage de celles-ci.

Une nouvelle méthode expérimentale (M.I.I.R.: Méthode d'Isolement et d'Identification des Résonances) a été mise au point au laboratoire [10,13,14]. Elle est basée sur l'existence d'un régime transitoire (vibration libre du cylindre) après la fin de l'insonification forcée. Elle conduit à l'enregistrement d'un "Spectre de résonances" finement résolu permettant de connaître avec précision la fréquence des résonances. L'identification des résonances se fait ensuite en relevant le diagramme angulaire de la vibration libre; le nombre de ventres totalisés est égal au double du nombre n qui caractérise le mode de vibration. Cette méthode est appliquée à l'étude de trois tubes plongés dans l'eau et remplis d'air. Leurs diamètres intérieur et extérieur sont identiques; l'un des tubes est en aluminium, l'autre en cuivre, le troisième en polychlorovinyle (PVC). Nous étudierons également

l'influence des résonances sur la courbe de rétrodiffusion en observant avec une plus grande résolution des "raies" du "Spectre des résonances" au voisinage immédiat d'une fréquence de résonance.

CONDITIONS EXPERIMENTALES : DESCRIPTION DE LA M.I.I.R.

Les tubes utilisés ont un diamètre extérieur $2a$ ($2a = 20$ mm) et un diamètre intérieur $2b$ ($2b = 18$ mm), ainsi le rapport des rayons b/a est égal à 0,9. Leur longueur est considérée comme infinie devant la longueur d'onde acoustique. La longueur du cylindre est égale, au moins, à 20 fois son diamètre. Les tubes sont remplis d'air et plongés dans l'eau. Les transducteurs utilisés en émetteur ou en récepteur possèdent une large bande passante et fonctionnent dans une gamme de fréquences comprise entre 0,2 et 3 MHz. Le diamètre du faisceau émis a une section droite supérieure à 40 mm, supérieure au diamètre de l'échantillon. Les transducteurs sont positionnés avec précision de telle sorte que l'axe du faisceau incident soit perpendiculaire à l'axe du cylindre. Les échantillons sont insonifiés par des trains de sinusoïde d'une durée au moins égale à 400 μ s. Cette durée doit être telle qu'un régime permanent s'établisse dans le cylindre sans que des échos parasites provenant des parois de la cuve perturbent la mesure.

Deux chaînes de mesure sont utilisées suivant qu'on enregistre un spectre ou un diagramme angulaire [10,13,14,15]:

- La première est constituée par un générateur de fonctions commandé en mode porte par un générateur d'impulsions qui fixe l'origine des temps et la longueur des rafales de sinusoïde. La fréquence de la sinusoïde est pilotée par une rampe qui permet une variation très lente de cette fréquence; en effet, dans une rafale, la fréquence peut être considérée comme constante, alors que, entre deux rafales, la fréquence a très légèrement varié. Une porte analogique, commandée avec un retard variable permet de faire fonctionner le transducteur en émetteur ou en récepteur. Le signal reçu est alors amplifié afin d'obtenir un niveau mesurable par le détecteur-crête qui est positionné avec un retard choisi. Une table traçante enregistre la tension-crête proportionnelle à la pression acoustique en fonction de la fréquence.



SPECTRES ACOUSTIQUES DE TUBES ELASTIQUES PLONGES DANS L'EAU
ACOUSTIC SPECTRA OF ELASTIC CYLINDRICAL SHELLS IMMERSSED IN WATER

- La seconde met en jeu un matériel identique, toutefois, l'émetteur est directement excité par le générateur de fonctions. Un transducteur récepteur tourne autour du cylindre à distance constante et mesure la pression diffusée. Un détecteur-crête positionné avec un retard convenable permet d'enregistrer sur une table traçante un signal proportionnel à la pression acoustique en fonction de l'angle azimutal φ .

L'observation sur un oscilloscope du signal rétrodiffusé ($\varphi=180^\circ$) montre, lorsque la fréquence correspond à une résonance, une forme caractéristique [10,14]. Au début du régime forcé, il apparaît un régime transitoire qui peut être différent suivant les résonances; il est suivi d'un régime permanent, puis, après l'excitation forcée, d'un régime de réémission libre dont l'amplitude décroît exponentiellement en fonction du temps.

ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX POUR LE TUBE D'ALUMINIUM

Les figures 1 à 3 donnent pour le tube d'aluminium plein d'air :

- en A, l'amplitude de la pression acoustique mesurée au cours du régime permanent (cette courbe est équivalente à la fonction de forme en champ lointain: c'est le spectre de rétrodiffusion habituellement examiné).

- en B, l'amplitude de la réémission libre mesurée 30 μ s après la fin de l'insonification forcée ("Spectre des résonances" provenant de la M.I.I.R).

L'analyse et l'interprétation de ces résultats ont fait l'objet de publications [7,13,15,16,17]. Il a été montré que les résonances sont dues à des ondes circonférentielles qui forment des ondes stationnaires sur la circonférence du cylindre. Ces résonances sont groupées en séries notées l qui sont bien séparées lorsque le rapport des rayons b/a tend vers 1. La figure 4 présente l'évolution du mode n en fonction de la fréquence réduite. Il est possible de remarquer que les résonances d'une même série s'élargissent lorsque leur mode croît.

Les figures 1 à 3 montrent qu'une relation existe entre les "raies" des spectres B et les variations brusques des courbes de rétrodiffusion A.

La figure 5 présente les enregistrements obtenus avec une grande résolution autour de deux résonances caractéristiques: l'une pour la fréquence réduite $ka=16,1$ et l'autre pour la fréquence

réduite $ka=34,9$. Les courbes A_i ($i=1,2$)(fig.5) correspondent aux mesures faites dans le régime permanent, les courbes B_i à la réémission libre après insonification forcée. La première résonance ($ka=16,1$) se traduit sur la courbe du haut par un minimum alors que la seconde résonance ($ka=34,9$) se traduit seulement par une variation rapide sans minimum marqué aussi nettement. L'évolution des courbes A_i n'est pas la même au voisinage de chacune de ces résonances. Pour mieux connaître cette évolution, des oscillogrammes (fig 6) montrant la forme de l'écho reçu ont été photographiés pour différentes fréquences autour de la résonance. L'observation de ces oscillogrammes montre des mécanismes résonnants totalement différents.

- Le mécanisme de la première résonance ($ka=16,1$) est relativement simple. Le régime transitoire au début de l'insonification forcée se traduit par une décroissance exponentielle identique à la décroissance exponentielle du second régime transitoire visible après la fin de l'insonification. Le régime permanent s'établit progressivement avec une amplitude toujours inférieure à l'amplitude constatée hors d'une résonance.

- Le mécanisme de la seconde résonance ($ka=34,9$) est beaucoup plus complexe. En l'examinant à fréquence croissante, on constate d'abord que le régime transitoire en début d'insonification forcée se traduit par une croissance exponentielle qui entraîne un régime permanent d'amplitude plus élevée puis, une décroissance exponentielle qui entraîne un régime permanent d'amplitude plus faible. Ainsi, le cylindre a un comportement différent suivant que la fréquence est inférieure ou supérieure à la fréquence de résonance.

Ces mécanismes différents de mise en résonance se manifestent pour l'échantillon d'aluminium utilisé essentiellement sur la série l=2. Le premier mécanisme s'observe pour les modes n petits, le second mécanisme s'observe pour les modes n plus grands. Il semble que ces différences soient en relation avec le coefficient de réémission de l'onde de galerie à écho (GE1) qui passe par un minimum pour une fréquence réduite voisine de 25 (sur la figure 1 la résonance de mode $n=6$, $ka=23,6$ est difficilement visible). Pour les fréquences inférieures, c'est le premier mécanisme qui entre en jeu; pour les fréquences supérieures, c'est le second mécanisme.



SPECTRES ACOUSTIQUES DE TUBES ELASTIQUES PLONGES DANS L'EAU
ACOUSTIC SPECTRA OF ELASTIC CYLINDRICAL SHELLS IMMERSED IN WATER

COMPARAISON AVEC LES RESULTATS EXPERIMENTAUX
OBTENUS POUR LES AUTRES TUBES.

L'enregistrement des spectres a été repris dans les mêmes conditions pour un tube de cuivre et pour un tube de polychlorovinyle (PVC). Les résultats sont donnés sur les figures 7 à 12.

Pour le PVC (fig. 7 à 9) nous n'obtenons aucune résonance liée à des ondes circonferentielles, les courbes B ne présentent aucun pic notable, seules des fluctuations dues au bruit sont détectables. Les courbes A présentent des minimums qui sont associés à des résonances d'épaisseur de la coque pour l'onde à vibration longitudinale. Ces minimums sont observables sur les autres échantillons pour des fréquences supérieures car les célérités longitudinales sont plus élevées.

Pour le tube de cuivre (fig. 10 à 12), nous retrouvons des résultats comparables à ceux obtenus pour le tube d'aluminium. Les résonances sont isolées; elles sont ensuite identifiées à l'aide des diagrammes angulaires qui donnent le mode n. Deux exemples sont donnés sur la figure 13 B1 et B2, ils sont comparés aux diagrammes angulaires obtenus en régime permanent (fig. 13 A1 et A2). La récapitulation des modes est faite sur les trajectoires de Regge de la figure 14. Nous pouvons faire deux remarques: les séries de résonances sont translatées vers les basses fréquences, les pentes des trajectoires plus grandes entraînent un resserrement des résonances. Les séries restent cependant bien séparées, car les résonances de mode élevé d'une série qui pourraient chevaucher les premiers modes de la série suivante sont peu actives.

CONCLUSION

L'ensemble de ces résultats montre qu'il est possible d'attribuer à un échantillon cylindrique un spectre qui dépend beaucoup du matériau le constituant. Lorsque la coque cylindrique s'aminuit, les séries de résonances se séparent. Les résonances pour un tube de cuivre, sont plus serrées en basse fréquence, il faut toutefois remarquer qu'il existe certaines analogies dans la suite d'apparition des séries.

L'influence de certaines résonances sur la courbe de rétrodiffusion obtenue en régime permanent est très caractéristique et met, sans aucun doute, en oeuvre des mécanismes complexes.

Ce travail illustre la possibilité, par l'analyse d'un spectre obtenu par la M.I.I.R., de connaître la constitution d'un objet cylindrique de dimensions connues. Inversement, il doit être possible de connaître les dimensions si le matériau est connu comme le remarquent BRILL, GAUNAURD et ÜBERALL dans une publication récente [18].

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] J.J. FARAN, J. Acoust. Soc. Am., vol. 23, p. 405 (1951).
- [2] P. UGINČIUS, H. ÜBERALL, J. Acoust. Soc. Am., vol. 43, p. 1025 (1968).
- [3] J.M. DICKEY, H. ÜBERALL, J. Acoust. Soc. Am., vol. 66, p. 275 (1979).
- [4] A. DEREM, Revue du CETHEDC, vol. 58, p. 43 (1979).
- [5] L.S. SCHUETZ, W.G. NEUBAUER, J. Acoust. Soc. Am., vol. 62, p. 513 (1977).
- [6] G. MAZE, A. FAURE, J. RIPOCHE, Revue du CETHEDC, vol. NS 80-1, p. 251 (1980).
- [7] A. DEREM, J.L. ROUSSELOT, G. MAZE, J. RIPOCHE, A. FAURE, Acustica, vol. 50, p. 39 (1982).
- [8] H. ÜBERALL, L.R. DRAGONETTE, L. FLAX, J. Acoust. Soc. Am., vol. 61, p. 711 (1977).
- [9] A. DEREM, J.L. ROUSSELOT, Revue du CETHEDC, vol. 67, p. 1 (1981).
- [10] G. MAZE, B. TACONET, J. RIPOCHE, 8^o Colloque sur le Traitement du Signal (G R E T S I), 1981.
- [11] L. FLAX, W.G. NEUBAUER, J. Acoust. Soc. Am., vol. 63, p. 675 (1978).
- [12] J.D. MURPHY, E.D. BREITENBACH, H. ÜBERALL, J. Acoust. Soc. Am., vol. 64, p. 677 (1978).
- [13] G. MAZE, B. TACONET, J. RIPOCHE, Phys. Letters, vol. 84A, p. 303 (1981).
- [14] G. MAZE, J. RIPOCHE, Rev. Phys. Appl., (sous presse).
- [15] G. MAZE, B. TACONET, J. RIPOCHE, Revue du CETHEDC, vol. 72, p. 103 (1982).
- [16] G. MAZE, J. RIPOCHE, J. Acoust. Soc. Am., vol. 73, p. 41 (1983).
- [17] L. FLAX, G.C. GAUNAURD, H. ÜBERALL, Physical Acoustics, vol. XV, Academic Press, 1981.
- [18] D. BRILL, G.C. GAUNAURD, H. ÜBERALL, J. Acoust. Soc. Am., vol. 72, p. 1067 (1982).

SPECTRES ACOUSTIQUES DE TUBES ELASTIQUES PLONGES DANS L'EAU
 ACOUSTIC SPECTRA OF ELASTIC CYLINDRICAL SHELLS IMMERSED IN WATER

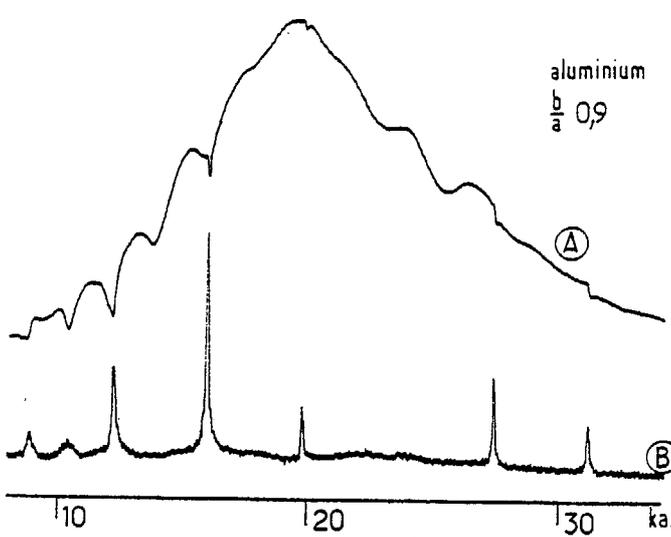


Figure 1

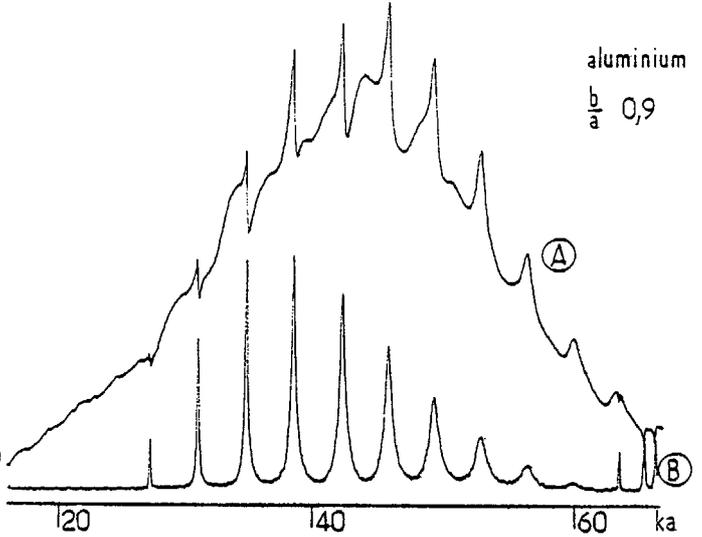


Figure 2

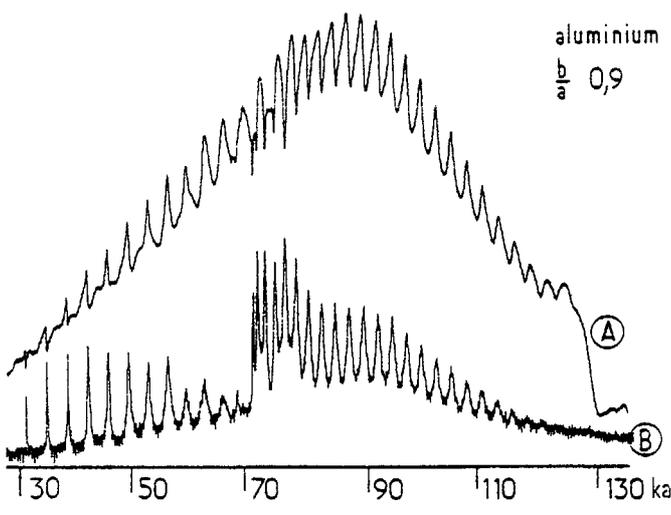


Figure 3

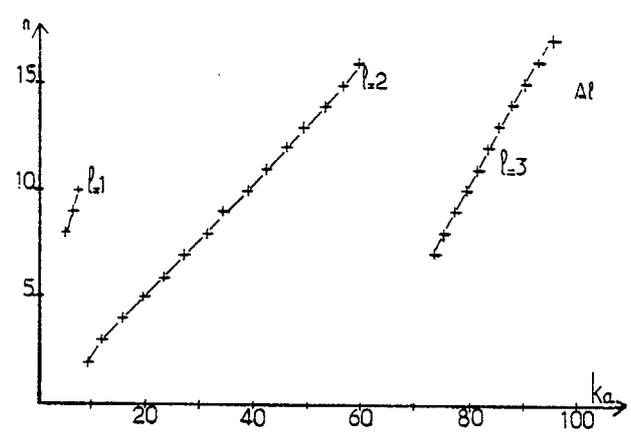


Figure 4

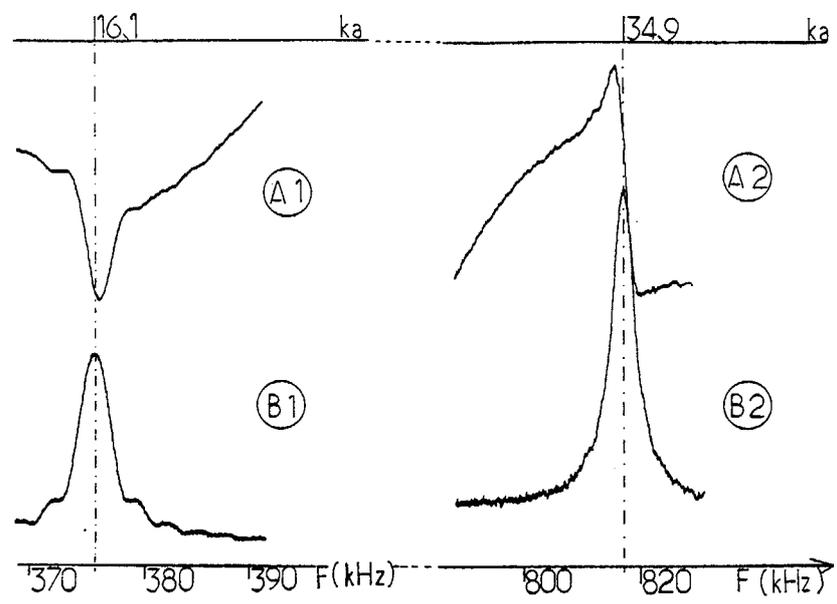
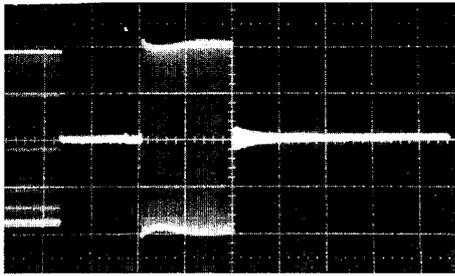


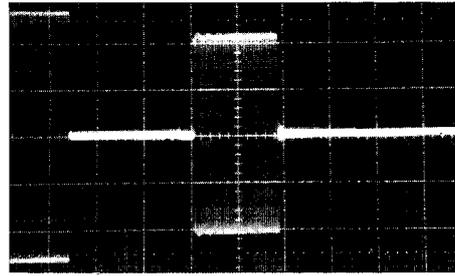
Figure 5



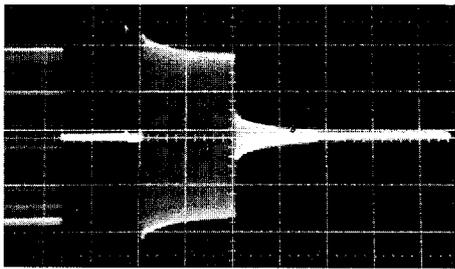
SPECTRES ACOUSTIQUES DE TUBES ELASTIQUES PLONGES DANS L'EAU
 ACOUSTIC SPECTRA OF ELASTIC CYLINDRICAL SHELLS IMMERSSED IN WATER



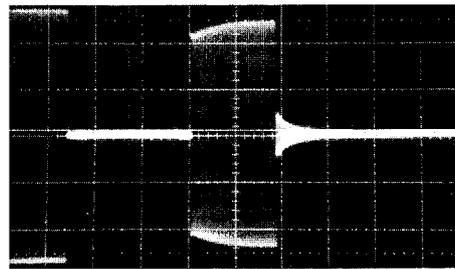
374 kHz



796 kHz

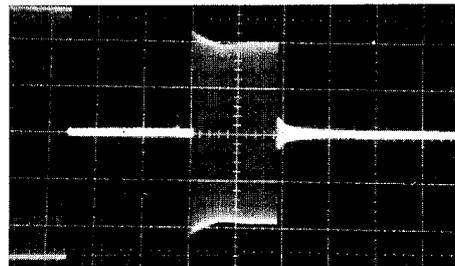


375,7 kHz



816 kHz

Figure 6 ($ka = 16,1$)



820 kHz

Figure 6 ($ka = 34,9$)

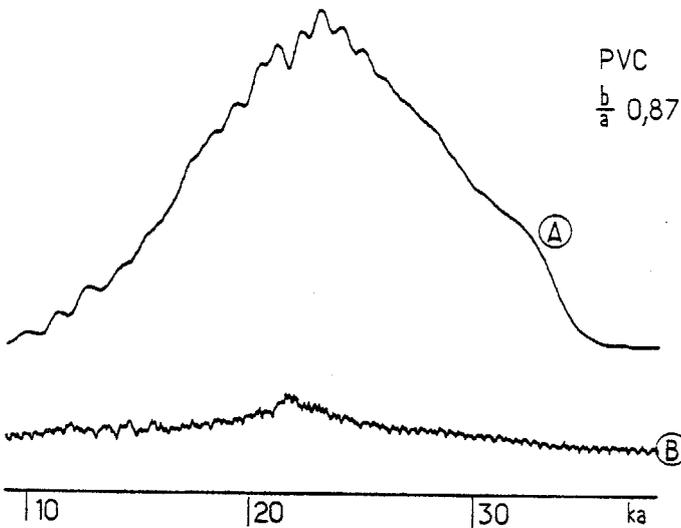


Figure 7

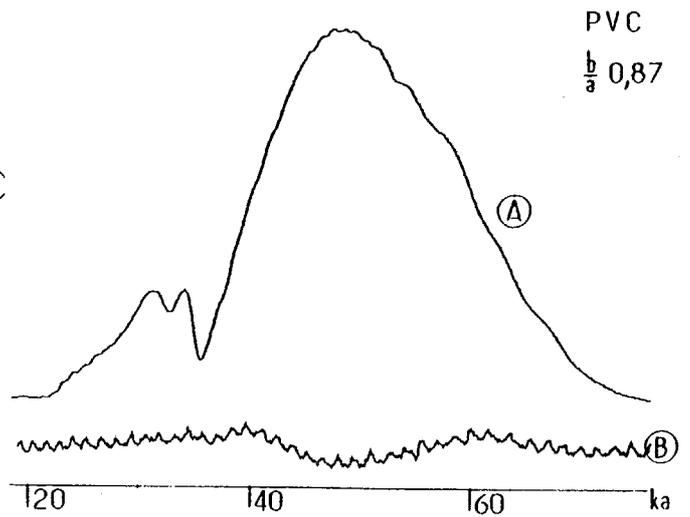


Figure 8

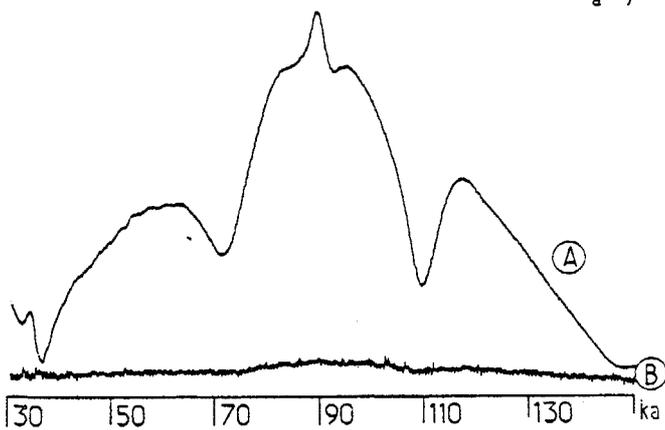


Figure 9

SPECTRES ACOUSTIQUES DE TUBES ELASTIQUES PLONGES DANS L'EAU
 ACOUSTIC SPECTRA OF ELASTIC CYLINDRICAL SHELLS IMMERSED IN WATER

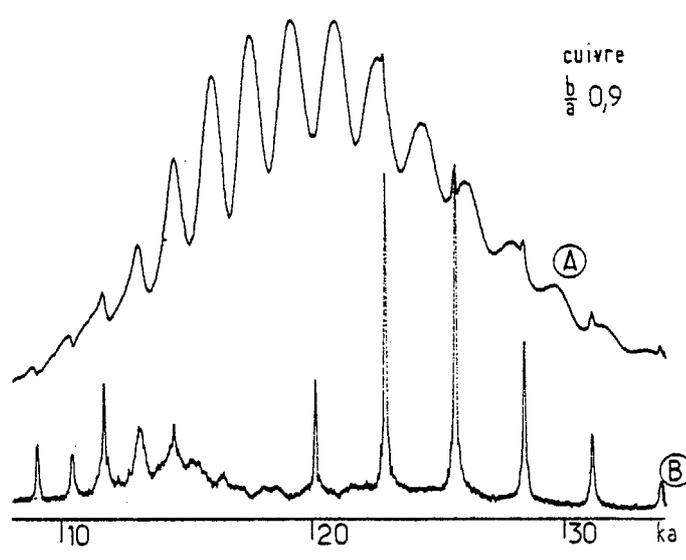


Figure 10

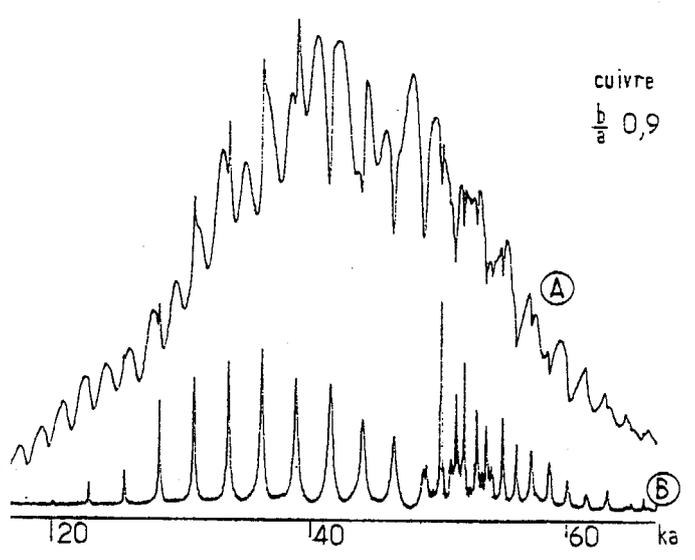


Figure 11

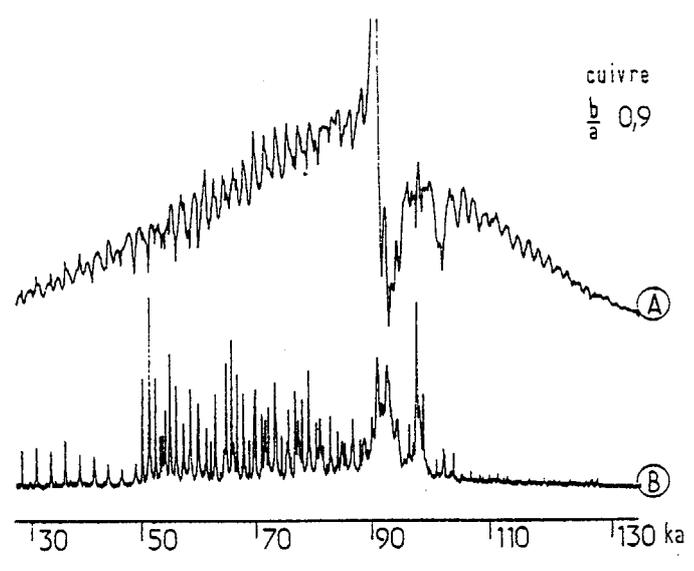


Figure 12

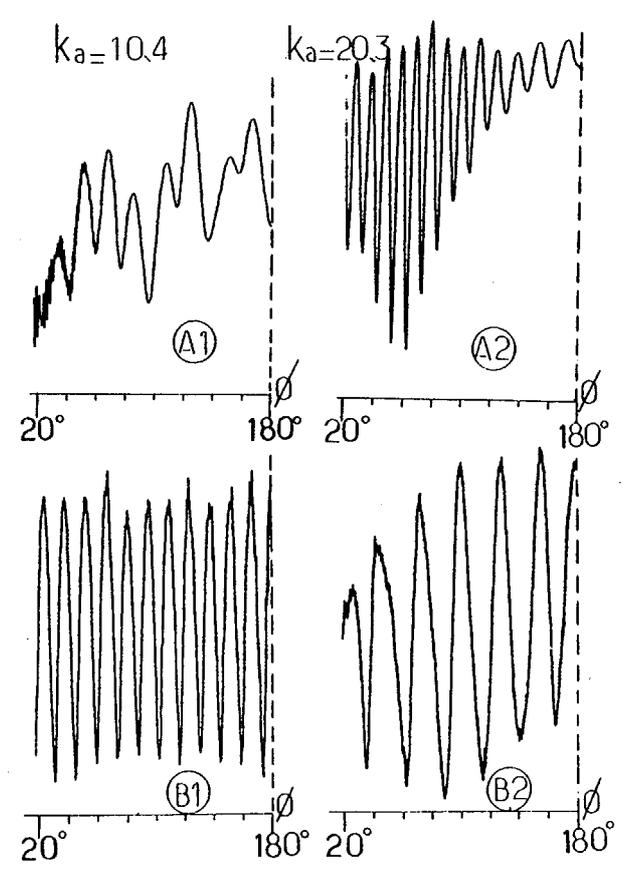


Figure 13

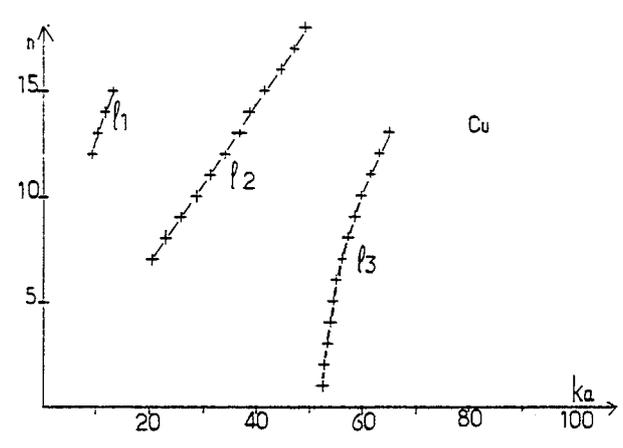


Figure 14

