

# HUITIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

637



NICE du 1<sup>er</sup> au 5 JUIN 1981

INFLUENCE DES ONDES CIRCONFÉRENTIELLES SUR LA DIFFUSION DES ONDES  
ULTRASONORES PAR DES CYLINDRES IMMERGES DANS L'EAU

INFLUENCE OF CIRCUMFERENTIAL WAVES ON ACOUSTIC SCATTERING FROM  
CYLINDERS SUBMERGED IN WATER

MAZE Gérard - TACONET Bruno - RIPOCHE Jean

Université de Haute Normandie - U.E.R.S.T. LE HAVRE  
Laboratoire d'Electronique et d'Automatique - Place Robert Schuman B.P. 4006 76077 LE HAVRE CEDEX

## RESUME

Dans ce travail, les auteurs étudient l'influence de deux types d'ondes circonférentielles sur le diagramme de diffusion du cylindre.

Les premières qui se propagent dans le solide élastique sont des ondes de "Galerie à écho". Elles réémettent leur énergie progressivement dans le liquide. Cette faible atténuation permet la formation d'ondes stationnaires qui persistent après l'arrêt de l'excitation forcée. Ces ondes stationnaires provoquent une émission cohérente qu'il est possible de détecter dans l'eau.

Les secondes qui se propagent dans le liquide sont les ondes de Franz. Elles diffusent rapidement leur énergie sous la forme d'ondes de volume dans le liquide, ce qui ne permet pas la formation d'ondes stationnaires donc de résonances.

Pour étudier l'influence des ondes de Galerie à écho, la recherche systématique des résonances est faite avec possibilité de les séparer lorsqu'elles sont voisines. Une mesure de l'atténuation en fonction de la fréquence est proposée à partir du signal réémis dans le liquide après l'arrêt de l'excitation forcée. Les ondes de Franz au contraire sont générées tangentiellement à la surface par un train d'onde de courte durée. La célérité et l'atténuation sont mesurées en fonction de la fréquence.

## SUMMARY

In this paper, the authors study the influence of two types of circumferential waves on acoustic scattering from a cylinder.

The first waves that propagate in the elastic cylinder are Whispering Gallery waves. They diffuse their energy progressively through the liquid. This small attenuation allows the formation of stationary waves which remain after excitation has stopped.

These stationary waves generate a coherent emission that it is possible to detect in the water.

The second waves that propagate in the liquid are the Franz waves. They diffuse their energy quickly as bulk waves, which does not permit the formation of stationary waves.

To study the influence of Whispering Gallery waves, systematic research on resonances is carried out, allowing also to separate them when they are close to each other. A measure of the attenuation as a function of the frequency is proposed from the signal diffused through the water when the excitation has stopped. The Franz waves are generated tangentially at the surface in short bursts. The velocity and the attenuation are measured as a function of the frequency.



INFLUENCE DES ONDES CIRCONFÉRENTIELLES SUR LA DIFFUSION DES ONDES  
ULTRASONORES PAR DES CYLINDRES IMMERGES DANS L'EAU  
INFLUENCE OF CIRCUMFERENTIAL WAVES ON ACOUSTIC SCATTERING FROM  
CYLINDERS SUBMERGED IN WATER

INTRODUCTION :

=====  
L'application de la transformation de Sommerfeld-Watson à la série de Rayleigh des modes normaux qui décrit la pression du signal acoustique diffusé par un cylindre, met en évidence une contribution géométrique en accord avec les lois de Descartes et une contribution provenant de la réémission d'ondes circonferentielles [ 1,2 ]. La contribution géométrique met en jeu une onde réfléchie et des ondes transmises. Ces dernières sont le résultat d'une propagation dans le cylindre suivant deux modes de vibration, transversal et longitudinal. Elles subissent des réflexions multiples dans le cylindre avec conversions de mode [ 3-5 ]. Les ondes circonferentielles peuvent être classées en deux catégories suivant que leur support est le liquide, ce sont les ondes de Franz, ou le cylindre solide, ce sont les ondes de Rayleigh et de Galerie à écho [ 6-11 ].

Les ondes circonferentielles vont tout particulièrement retenir notre attention dans ce travail. En effet, il a été calculé la contribution de certaines de ces ondes sur le diagramme angulaire [ 12,13 ], or expérimentalement toutes ces ondes sont générées et se propagent ensemble sur la circonférence du cylindre et la figure de diffusion est un mélange complexe de toutes les réémissions dans le milieu liquide. Dans l'étude qui suit nous tentons de séparer expérimentalement la contribution de chacune d'elle, en nous plaçant dans les conditions physiques les plus favorables.

Deux méthodes expérimentales sont utilisées pour étudier ces ondes. La première consiste à insonifier complètement un cylindre et à mesurer le signal réémis [ 14-17 ]. L'autre méthode consiste à insonifier le cylindre par un train d'ondes de courte durée dans un plan perpendiculaire à son axe sous un angle prédéterminé par rapport à la normale au cylindre [ 18,19 ]. Cette méthode est généralement utilisée pour des cylindres de grand diamètre devant la longueur d'onde alors que la première s'applique essentiellement, du moins jusqu'à présent, à des cylindres de petite dimension.

Dans ce travail les deux méthodes sont mises en oeuvre afin de connaître l'influence possible de ces ondes sur le diagramme angulaire d'un cylindre insonifié entièrement.

I/ INFLUENCE DES ONDES SE PROPAGEANT DANS LE  
===== SOLIDE :  
=====

Des études théoriques [ 12,13,20,21 ] mettent en évidence l'influence des ondes circonferentielles sur le diagramme de diffusion d'une onde ultrasonore plane par un cylindre plein de longueur infinie. Cette influence est montrée à partir du calcul de la fonction de forme en champ lointain [ 22 ] qui dépend de deux variables : la fréquence adimensionnelle "ka" (k nombre d'onde dans l'eau, a rayon du cylindre) et l'angle azimutal  $\varphi$ .

I.1. Courbes de rétrodiffusion

La pression du signal rétrodiffusé [  $\varphi = 180^\circ$  ] en fonction de la fréquence sans dimension ka est mesurée à l'aide d'un transducteur large bande fonctionnant en émetteur récepteur. Les échantillons qui sont des cylindres de diamètre "2a" et de longueur grande devant la longueur d'onde, sont insonifiés dans un plan perpendiculaire à leur axe sur toute leur section par un train de sinusoïdes de durée comprise entre 200 et 400  $\mu$ s. La durée de l'émission doit être suffisante pour qu'un régime permanent s'établisse dans le cylindre sans que des échos parasites, provenant de réflexions sur les parois de la cuve d'expérimentation ou sur les transducteurs, perturbent la mesure.

La cuve est remplie d'eau de masse volumique  $\rho_1$  ( $\rho_1 = 1 \text{ g/cm}^3$ ). La célérité de l'onde ultrasonore dans l'eau est c ( $c = 1470 \text{ m/s}$ ). Les cylindres polis sont en aluminium de masse volumique  $\rho_2$  ( $\rho_2 = 2,79 \text{ g/cm}^3$ ). Les célérités des ondes à vibration transversale et à vibration longitudinale dans le métal sont respectivement  $c_t$  ( $c_t = 3100 \text{ m/s}$ ) et  $c_\ell$  ( $c_\ell = 6380 \text{ m/s}$ ). Une porte analogique commandée par un système à

INFLUENCE DES ONDES CIRCONFÉRENTIELLES SUR LA DIFFUSION DES ONDES  
ULTRASONORES PAR DES CYLINDRES IMMERGES DANS L'EAU  
INFLUENCE OF CIRCUMFERENTIAL WAVES ON ACOUSTIC SCATTERING FROM  
CYLINDERS SUBMERGED IN WATER

retard numérique permet de faire fonctionner le transducteur en émetteur ou en récepteur. En émetteur, il est alimenté par un générateur de trains d'ondes sinusoïdales dont la fréquence est lentement variable en fonction du temps. Celle-ci est comprise entre 0,2 et 3 MHz. En récepteur, le signal après amplification est traité par un détecteur crête et enregistré sur une table traçante X-Y en fonction de la fréquence. Sur les enregistrements la bande passante des transducteurs n'est pas corrigée.

Les résultats expérimentaux publiés jusqu'à présent décrivent les variations de l'amplitude du train d'ondes rétrodiffusé ( $\varphi = 180^\circ$ ) en fonction de la fréquence "ka" [ 14-17 ]. Ces résultats sont en accord avec les calculs théoriques. La structure complexe de cette courbe (figure 1b), formée de maximums et de minimums est attribuée à la génération d'ondes circonférentielles du type Rayleigh ou Galerie à écho [ 17,20,21 ] qui forment des ondes stationnaires sur la circonférence du cylindre.

Si nous observons la forme du signal réémis en fonction du temps, hors d'une résonance (figure 2a) et à une résonance (figure 2b), nous constatons dans le second cas la modification de l'amplitude du train d'ondes et l'apparition d'une traînée qui décroît en fonction du temps. Cette traînée peut être liée à la réémission d'une énergie emmagasinée dans le cylindre, puis restituée progressivement lorsque l'excitation est achevée. Si nous enregistrons ce signal, quelques microsecondes après la fin de l'insonification, nous obtenons la courbe de la figure 1a. Cette courbe présente des pics bien isolés qui sont liés à la formation des résonances des ondes de Galerie à écho (figure 1c). Cet enregistrement qui est fait pour un ka compris entre 11 et 37 peut être prolongé vers les basses fréquences  $2 < ka < 13$  (figure 3) et vers les hautes fréquences  $25 < ka < 80$  (figure 4). Sur toutes ces courbes nous n'avons pas compensé la bande passante du transducteur émetteur récepteur, nous ne nous intéressons dans ce travail qu'aux résonances.

### I.2. Diagrammes angulaires

Afin de bien préciser le comportement des ondes circonférentielles lors de ces résonances, nous avons, pour la plupart des fréquences correspondant à un pic de la figure 1a, enregistré un diagramme angulaire. Le transducteur précédent ne fonctionne qu'en émetteur, un transducteur récepteur tourne autour du cylindre dans le plan de l'émission, à une distance constante égale à 0,6 m. Le détecteur crête mesure le signal émis par le cylindre, après le régime forcé comme dans le cas précédent. Un échantillon des résultats est donné sur la figure 5. Ces courbes sont l'image des ondes stationnaires qui s'établissent dans le cylindre. En comptant le nombre de maximums sur une conférence, il est aisé de connaître le mode de vibration d'une résonance et ainsi confirmer les résultats théoriques.

### I.3. Séparation des résonances en haute fréquence

Si nous analysons les résultats de la figure 4, nous constatons que pour des ka supérieurs à 30 il est difficile de séparer les différentes résonances, celles-ci étant très voisines les unes des autres. La méthode précédente (I.2.) utilisée en faisant des enregistrements pour des fréquences voisines, permet de connaître certaines de ces résonances. Sur la figure 6, nous donnons quelques diagrammes angulaires pour des ka compris entre 54 et 56. Il est ainsi possible de séparer certains de ces modes ( $n = 13, 6, 9$ ) qui correspondent à différentes ondes de Galerie à échos. La séparation entre les différentes résonances n'est pas parfaite à cause de leur proximité.

### I.4. Mesure de l'atténuation et comparaison avec des résultats théoriques

L'observation de la traînée, nous montre qu'il existe une décroissance exponentielle de niveau. Ce phénomène est lié à la réémission de l'onde circonférentielle dans le milieu liquide. Le cylindre qui a accumulé de l'énergie, se comporte comme un oscillateur libre après la fin du régime forcé. En enregistrant l'amplitude du



INFLUENCE DES ONDES CIRCONFÉRENTIELLES SUR LA DIFFUSION DES ONDES  
ULTRASONORES PAR DES CYLINDRES IMMERGES DANS L'EAU

INFLUENCE OF CIRCUMFERENTIAL WAVES ON ACOUSTIC SCATTERING FROM  
CYLINDERS SUBMERGED IN WATER

signal dans la traînée pour des retards croissants, il est possible de calculer un coefficient d'atténuation pour chaque résonance qui donne l'image de la réémission dans le milieu liquide. L'expression de cette atténuation peut se mettre sous la forme :

$$\beta = \frac{a \cdot n}{(ka)c(\tau_2 - \tau_1)} \cdot \text{Log}_e \frac{V_1}{V_2}$$

avec : a rayon du cylindre  
n mode de la résonance  
ka fréquence sans dimension  
c célérité dans l'eau  
 $\tau_2$  et  $\tau_1$  retard compté à partir de la fin de l'excitation  
 $V_2$  et  $V_1$  niveau du signal

La comparaison avec les résultats théoriques [ 8 ] figure 7 nous montre un bon accord.

### I.5. Discussion

A partir de ces mesures, il est possible de dire que le cylindre se comporte comme émetteur libre lorsque une onde de galerie à écho entre en résonance, c'est-à-dire qu'il se forme une onde stationnaire sur la circonférence du cylindre. Il semble alors que parmi toutes les ondes qui sont générées dans l'échantillon celle qui résonne est privilégiée. Les autres ondes qui se propagent dans le cylindre et qui ne forment pas d'ondes stationnaires rayonnent dans le liquide de manière incohérente.

Pour observer les ondes circonférentielles dans d'autres conditions que celles décrites précédemment, il est nécessaire de favoriser leur propagation en les excitant sous angle critique défini par :

$$\sin \theta_c = \frac{c}{c_s}$$

$c_s$  célérité de l'onde circonférentielle

Un exemple d'une telle excitation est donné sur la photographie de la figure 8. Il est possible de voir des trains de sinusoïdes de fréquence centrale 2 MHz et de durée 7  $\mu$ s qui correspondent à des réémissions suivant l'angle prédéterminé  $\theta_c$  après chaque tour de cylindre. L'atténuation qui est mesurée dans ces conditions pour un ka égal à 400 est :

$$\beta = 0,07 \text{ Neper/radian}$$

ce qui est de l'ordre des atténuations obtenu pour les ondes de Galerie à écho.

### II/ INFLUENCE DES ONDES SE PROPAGEANT DANS

#### LE LIQUIDE :

Les ondes de Franz qui ont pour support le liquide ont des célérités voisines de celles des ondes se propageant en champ libre dans l'eau [ 6,7 ], mais elles diffusent très rapidement, c'est-à-dire que leur coefficient d'atténuation est grand devant ceux obtenus précédemment. Pour cette dernière raison, il est difficile d'obtenir des ondes stationnaires.

Afin d'étudier ces ondes il est donc nécessaire de les générer à l'aide d'un train d'onde de courte durée tangentiellement à la circonférence du cylindre. La réception se fait à l'aide d'un transducteur qui se trouve placé dans une position identique. Le niveau de l'écho provenant de l'onde de Franz (figure 9) est mesuré en fonction de la position et de la fréquence [ 23 ]. La célérité pratiquement indépendante de la fréquence est donnée dans le tableau A pour des cylindres constitués de matière différente. Les résultats

Tableau A

échantillons	$C_F$	$\Delta C_F$
Aluminium 25 < ka < 800	1450 $\pm$ 30 m/s	
laiton 25 < ka < 500	1440 $\pm$ 30 m/s	
polychlorovinyle 25 < ka < 400	1390 $\pm$ 30 m/s	

relatifs à l'atténuation mesurée en fonction de la fréquence sont regroupés sur le diagramme

INFLUENCE DES ONDES CIRCONFÉRENTIELLES SUR LA DIFFUSION DES ONDES  
 ULTRASONORES PAR DES CYLINDRES IMMERGES DANS L'EAU  
 INFLUENCE OF CIRCUMFERENTIAL WAVES ON ACOUSTIC SCATTERING FROM  
 CYLINDERS SUBMERGED IN WATER

de la figure 10.

Ces résultats expérimentaux confirment ceux publiés précédemment [ 11 ]. Ils montrent que ces ondes ne peuvent pas se propager longtemps sur la circonférence, elles réémettent très vite leur énergie sous la forme d'ondes de volume dans le liquide.

CONCLUSION :  
 =====

Dans cette étude nous présentons deux types très différents d'ondes ; l'une se propage dans le cylindre et rayonne très progressivement son énergie, l'autre au contraire se propage dans le liquide et rayonne très vite son énergie. Les premières peuvent former des ondes stationnaires et entrer ainsi en résonances, les secondes se propagent difficilement et ne forment pas d'ondes stationnaires.

Dans le diagramme de diffusion d'une onde ultrasonore par un cylindre, ce sont essentiellement les résonances qui apporteront des informations sur sa dimension et sur sa constitution. A la résonance, le cylindre se comporte comme un émetteur d'ondes cohérentes qu'il est facile de mettre en évidence. Comme ces résonances sont une caractéristique du cylindre, il est possible par analyse du signal diffusé de reconnaître un cylindre métallique.

BIBLIOGRAPHIE :  
 =====

[ 1 ] R.D. DOOLITTLE, H. ÜBERALL, P. UGINČIUS, J. Acoust. Soc. Am., vol. 43, p. 1 (1968).

[ 2 ] W.G. NEUBAUER, P. UGINČIUS, H. ÜBERALL Z. Naturforschung, vol. 24, p. 691, (1969).

[ 3 ] D. BRILL, H. ÜBERALL, J. Acoust. Soc. Am., vol. 47, p. 1468, (1970).

[ 4 ] M. de BILLY et P.J. WELTON, Revue du CETHEDDEC, vol. 60, p. 189 (1979).

[ 5 ] P.J. WELTON, M. de BILLY, A. HAYMAN, G. QUENTIN, J. Acoust. Soc. Am., vol. 67, p. 470 (1980).

[ 6 ] W.G. NEUBAUER, J. Acoust. Soc. Am., vol. 44, p. 298 (1968).

[ 7 ] W.G. NEUBAUER, J. Acoust. Soc. Am., vol. 45, p. 1134 (1969).

[ 8 ] J.W. DICKEY, G.V. FRISK, H. ÜBERALL, J. Acoust. Soc. Am., vol. 59, p. 1339 (1976).

[ 9 ] L.R. DRAGONETTE, J. Acoust., Soc. Am., vol. 65, p. 1570, (1979).

[ 10 ] G.V. FRISK, H. ÜBERALL, J. Acoust. Soc. Am., vol. 59, p. 46 (1976)

[ 11 ] G.V. FRISK, J.W. DICKEY, H. ÜBERALL, J. Acoust. Soc. Am., vol. 58, p. 996 (1975).

[ 12 ] J.W. DICKEY, H. ÜBERALL, J. Acoust. Soc. Am., vol. 63, p. 319 (1978).

[ 13 ] J.W. DICKEY, H. ÜBERALL, J. Acoust. Soc. Am., vol. 66, p. 319 (1979).

[ 14 ] L.S. SCHUETZ, W.G. NEUBAUER, J. Acoust. Soc. Am., vol. 62, p. 513 (1977).

[ 15 ] A. FAURE, G. MAZE, J. RIPOCHE, Revue du CETHEDDEC, vol. 60, p. 175 (1979).

[ 16 ] G. MAZE, A. FAURE, J. RIPOCHE, Revue du CETHEDDEC, vol. N.S. 80-1, p. 251, (1980).

[ 17 ] A. DEREM, G. MAZE, J.L. ROUSSELOT, A. FAURE J. RIPOCHE, Acustica (à paraître).

[ 18 ] R.R. GOODMAN, R.E. BUNNEY, S.W. MARSHALL, J. Acoust., Soc. Am., vol. 42, p. 523 (1962).

[ 19 ] R.E. BUNNEY, R.R. GOODMAN, S.W. MARSHALL, J. Acoust., Soc. Am., vol. 46, p. 1223 (1969).

[ 20 ] L. FLAX, L.R. DRAGONETTE, H. ÜBERALL, J. Acoust., Soc. Am., vol. 63, p. 723 (1978).

[ 21 ] A. DEREM, Revue du CETHEDDEC, vol. 58, p. 43 (1979)

[ 22 ] J.J. FARAN, J. Acoust. Soc. Am., vol. 23, p. 405 (1951).

[ 23 ] G. MAZE, A. FAURE, J. RIPOCHE, Phys. Letters, vol. 75 A, p. 214 (1980).



INFLUENCE DES ONDES CIRCONFÉRENTIELLES SUR LA DIFFUSION DES ONDES  
 ULTRASONORES PAR DES CYLINDRES IMMERGES DANS L'EAU  
 INFLUENCE OF CIRCUMFERENTIAL WAVES ON ACOUSTIC SCATTERING FROM  
 CYLINDERS SUBMERGED IN WATER

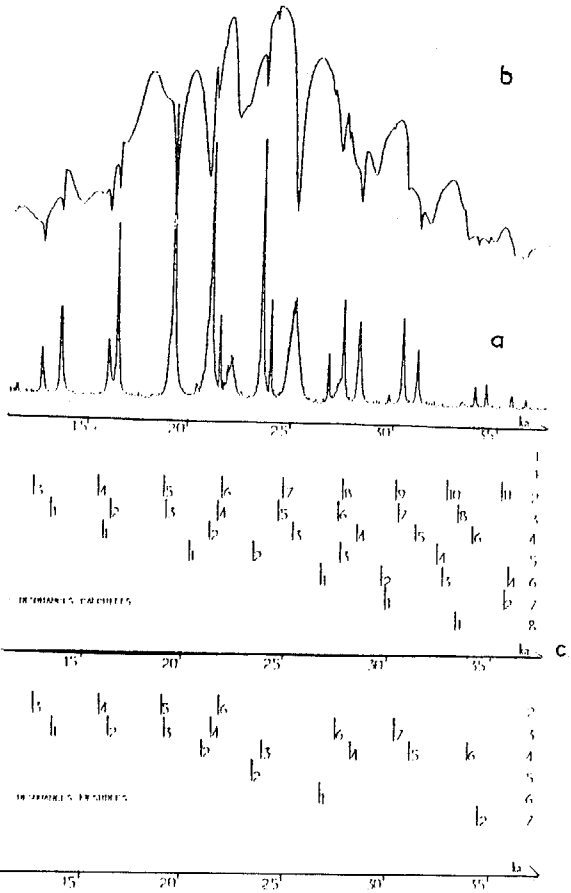


Figure 1

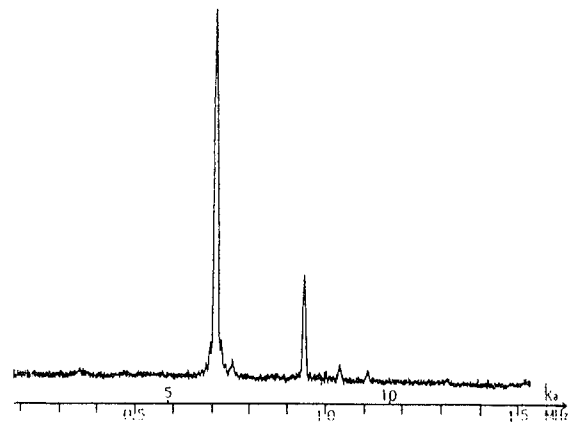


Figure 3

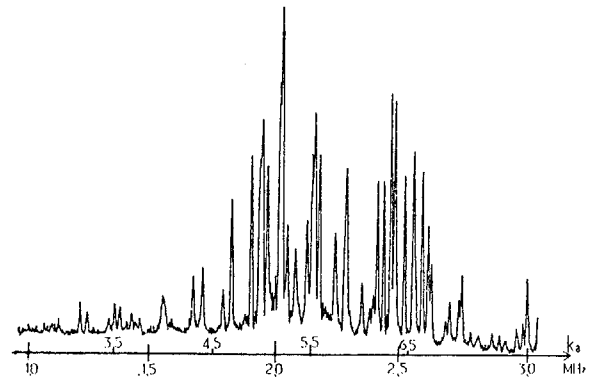
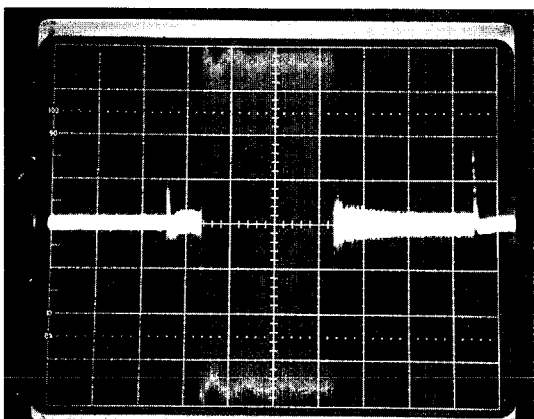
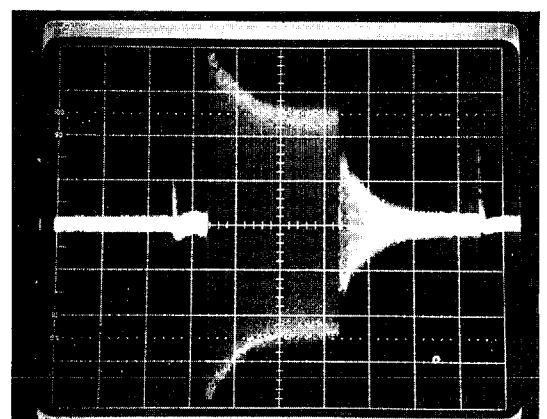


Figure 4



a)



b)

Figure 2

INFLUENCE DES ONDES CIRCONFÉRENTIELLES SUR LA DIFFUSION DES ONDES  
 ULTRASONORES PAR DES CYLINDRES IMMERGES DANS L'EAU  
 INFLUENCE OF CIRCUMFERENTIAL WAVES ON ACOUSTIC SCATTERING FROM  
 CYLINDERS SUBMERGED IN WATER

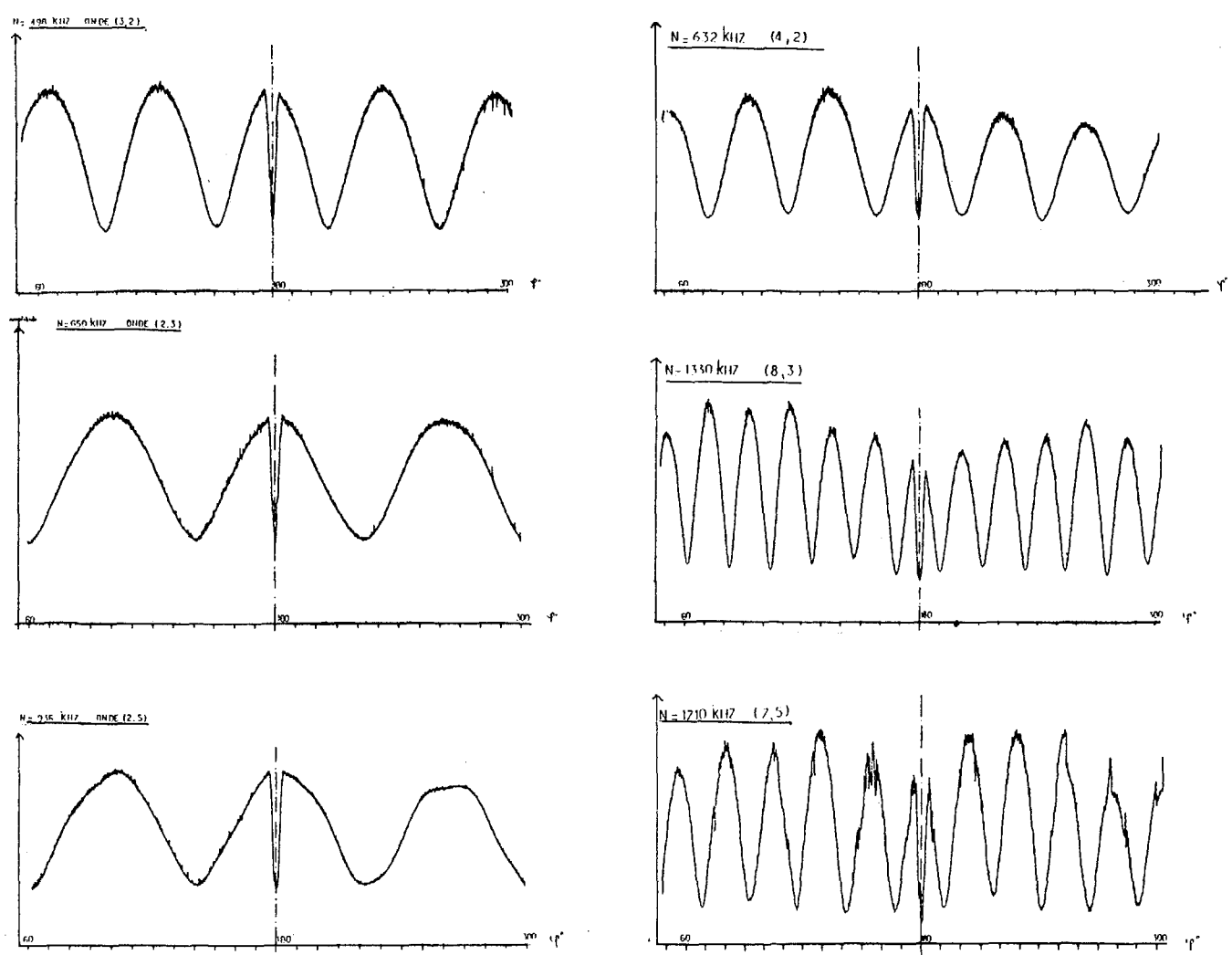


Figure 5

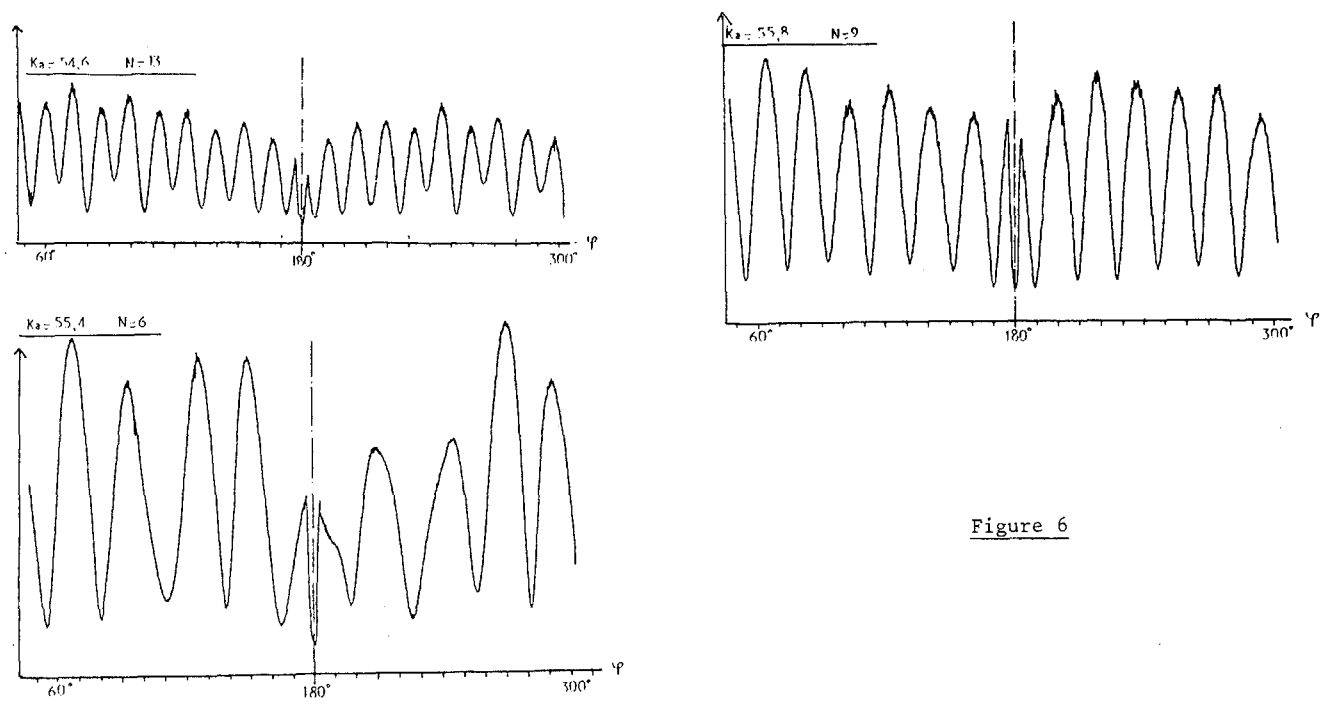


Figure 6





INFLUENCE DES ONDES CIRCONFÉRENTIELLES SUR LA DIFFUSION DES ONDES  
ULTRASONORES PAR DES CYLINDRES IMMERGES DANS L'EAU  
INFLUENCE OF CIRCUMFERENTIAL WAVES ON ACOUSTIC SCATTERING FROM  
CYLINDERS SUBMERGED IN WATER

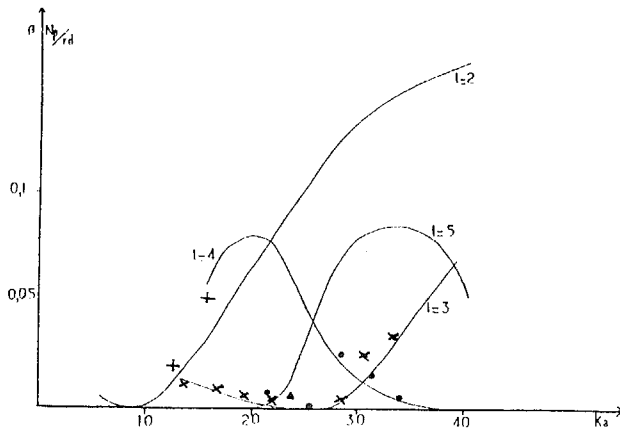


Figure 7

- + mesures de l'atténuation pour  $l = 2$
- x mesures de l'atténuation pour  $l = 3$
- o mesures de l'atténuation pour  $l = 4$
- ▲ mesures de l'atténuation pour  $l = 5$

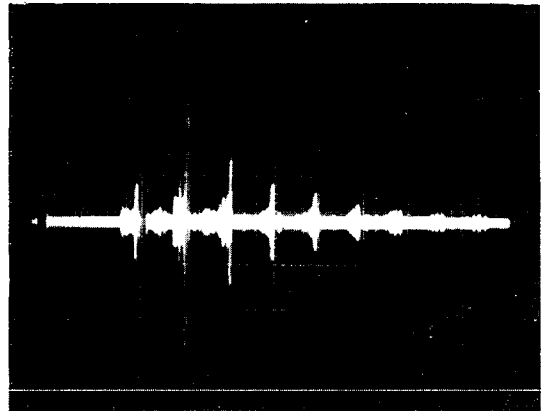


Figure 8

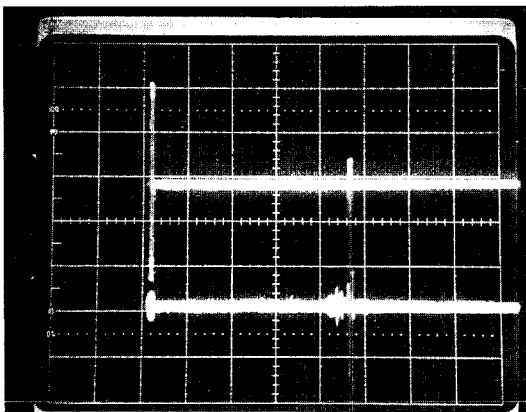


Figure 9

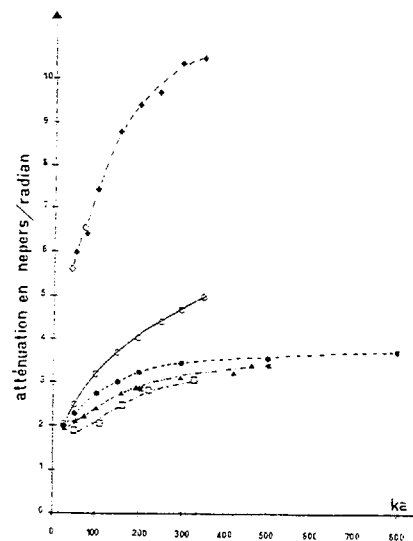


Figure 10 :

- o résultats théoriques : cylindre rigide (W. Franz, R.D. Doolittle, G.V. Frisk)
- ◇ résultats théoriques : cylindre mou (G.V. Frisk)
- ★ résultats théoriques : cylindre aluminium (G.V. Frisk)
- résultats expérimentaux sur l'aluminium (W.G. Neubauer)
- résultats expérimentaux sur l'aluminium
- ▲ résultats expérimentaux sur le laiton
- ◆ résultats expérimentaux sur le polychlorovinyle