

SIGNATURES SPECTRALES D'OBJETS IMMERGÉS PASSIFS OU ACTIFS  
SPECTRUM SIGNATURES OF PASSIVE OR ACTIVE TARGETS

J. RIPOCHE, G. MAZE, J.L. IZBICKI, P. PAREIGE

Laboratoire d'Electronique et d'Automatique (ULTRASONS)  
Université du Havre, Place Robert Schuman  
76 610 LE HAVRE FRANCE

La signature acoustique d'objets élastiques immergés dans l'eau ou d'inclusions dans des matériaux élastiques est plus facile à obtenir et à interpréter depuis la mise au point par les auteurs, en 1981, de la "Méthode d'Isolement et d'Identification des Résonances" (M.I.I.R). L'origine de nouvelles familles de résonances a pu être déterminée. Des signatures caractéristiques sont obtenues pour des objets "passifs" tels que des cylindres, des tubes remplis d'air ou de liquide. Les auteurs examinent ensuite des objets "actifs" renfermant une source d'émission acoustique. En outre, ils comparent les résultats obtenus par la M.I.I.R et ceux obtenus par le traitement par transformée de Fourier discrète des échos provenant d'une seule émission incidente courte.

INTRODUCTION

Depuis les travaux de J.J. FARAN [1] et de R. HICKLING [2], des progrès considérables ont été accomplis dans la compréhension des mécanismes physiques intervenant dans la diffusion des ondes acoustiques par des objets immergés. H. ÜBERALL [3,4] a introduit la "Théorie de la Diffusion résonante." On trouvera, dans les références [5 à 12] des bibliographies de travaux portant sur la diffusion d'objets immergés. A. DEREM a écrit plusieurs articles de synthèse [13], montrant que l'analyse de la diffusion acoustique par des objets immergés conduit à une véritable spectroscopie acoustique rendant possible une information précise sur la composition et la forme des objets insonés. Des spectrogrammes ont été donnés également par H. ÜBERALL [14] sous forme de "Schémas de niveaux". Cependant, il est difficile de séparer la contribution résonante de la contribution non résonante dans le spectre de rétrodiffusion habituellement obtenu dans le régime permanent lors d'une insonation de longue durée.

En 1981, G. MAZE [15] publie un premier spectre expérimental finement résolu obtenu par une méthode, appelée "Méthode d'Isolement et d'Identification des Résonances" (M.I.I.R) [16], appliquée à un cylindre massif insoné. En 1983, une visualisation des phénomènes de propagation confirme les résultats obtenus électriquement [17].

1- LES METHODES1.1 Méthode quasi-harmonique

The acoustic signature of elastic targets immersed in water or inclusions in elastic materials is more easily obtained and interpreted since the implementation, by the authors, in 1981, of the "Method of Isolation and Identification of Resonances" (M.I.I.R). The origin of new series of resonances has been explained. Characteristic signatures are obtained with "passive" targets, e.g. cylinders, air or liquid filled cylindrical shells. Then, the authors examine "active" targets containing an internal acoustic source. They compare the results obtained by the M.I.I.R with those obtained by a F.F.T spectral analysis of echoes after a single incident acoustic pulse.

La M.I.I.R a été décrite de façon détaillée par les auteurs [16,18]. Rappelons que les objets sont soumis à des salves ultrasonores de longue durée, voisine de 200  $\mu$ s pour une fréquence de 1 MHz. Le "Spectre de rétrodiffusion" est obtenu par la mesure de l'amplitude du signal rétrodiffusé observé dans le régime permanent. Il donne, une fonction de forme en champ lointain  $F_{\infty}(\alpha, \varphi)$  représentant la pression diffusée,  $\alpha = k_1 a$ ;  $k_1 = \omega / C_1$ ;  $C_1$  vitesse du son dans l'eau;  $a$  et  $b$  les rayons extérieur et intérieur de la coque cylindrique;  $\varphi$  angle azimutal. Le "Spectre des Résonances" est obtenu en mesurant l'amplitude dans le régime transitoire à un certain instant après la fin de l'insonation, c'est à dire dans la traînée de la réémission libre de la cible correspondant au "ringing" des résonances. Les résonances se manifestent alors par des raies très marquées. Les accidents, le plus souvent difficiles à mettre en évidence dans les spectres de rétrodiffusion, se manifestent alors très nettement.

La M.I.I.R présente, en outre, l'intérêt d'une mesure expérimentale du mode de vibration  $n$ . On fixe alors la fréquence d'excitation à une valeur de fréquence de résonance. La figure obtenue, en forme de paquerette, permet de déduire le mode de vibration  $n$ .

1.2 Méthode impulsionnelle

Les "Spectres de Rétrodiffusion" et les "Spectres des Résonances" peuvent être obtenus par une méthode impulsionnelle utilisant un seul signal incident "court". Des travaux théoriques et expérimentaux ont porté sur l'étude de la réponse impulsionnelle diffusée par des cibles [10, 19, 20].

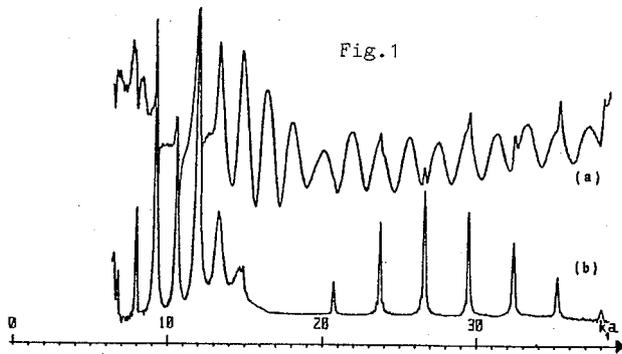


Récemment, M. de BILLY [21] a obtenu, en sélectionnant judicieusement certains échos de la réponse impulsionnelle, et en employant un analyseur de spectres, les "Spectres des Résonances" de fils métalliques ; citons aussi S.K. NUMRICH [22] qui a obtenu la réponse élastique de coques après sélection d'échos et traitement par un algorithme de T.F.D. Nous procédons, à la suite d'une unique impulsion incidente, à la numérisation de la réponse temporelle reçue pour obtenir, après traitement par un algorithme de T.F.D, le spectre de fréquence de la réponse rigide, le spectre de rétrodiffusion correspondant à l'ensemble de la réponse et le spectre de fréquence de la réponse résonante [23].

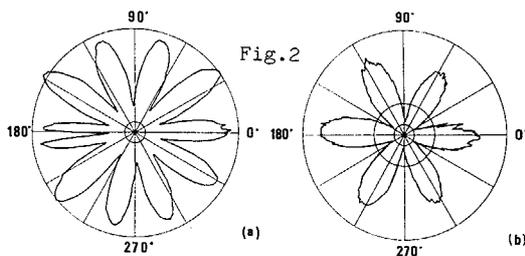
## 2- OBJETS PASSIFS

### 2.1 Cylindres et tubes pleins d'air

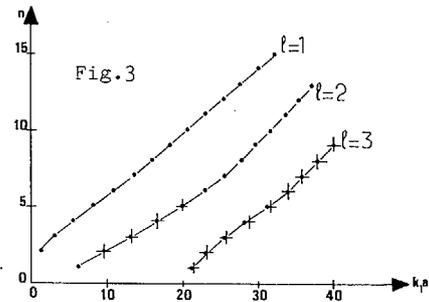
La figure 1a représente un "Spectre de Rétrodiffusion" et la figure 1b un "Spectre des Résonances"



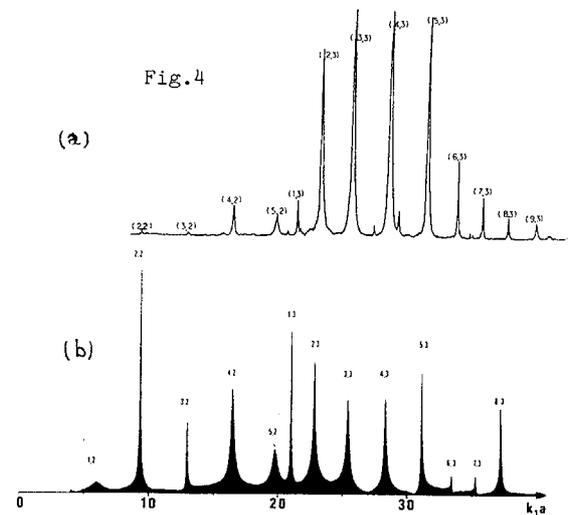
d'un tube de cuivre plein d'air ( $b/a = 0,9$ ) insoné normalement à son axe. Ils sont corrigés pour tenir compte de la réponse en fréquence des transducteurs. La figure 2a donne un diagramme d'identification d'une onde circconférentielle ( $n = 5$ ). Le minimum apparaissant pour



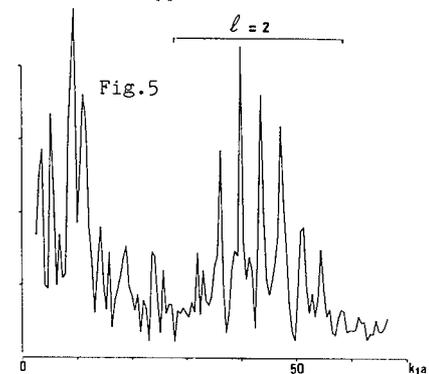
$\varphi = 180^\circ$  correspondant à l'occultation de l'émetteur par le récepteur. Le mode de respiration  $n = 0$  a pu, dans certains cas être identifié par la M.I.I.R [24]. Chaque résonance est référencée par deux nombres, le premier donne le mode de vibration  $n$ , le deuxième donne la série  $l$  ( $l = 1$  onde de Rayleigh,  $l = 2, 3 \dots$  ondes de galerie à écho  $GE_1, GE_2 \dots$ ). Grâce à la mesure de  $n$ , les résonances peuvent être groupées par familles même dans des domaines de fréquence où plusieurs familles se superposent. Les résonances se regroupent par famille sur les courbes de Regge. La figure 3 en donne un exemple (tube d'aluminium plein d'air  $b/a = 0,67$ ) ; on y remarque l'accord entre théorie  $\bullet$  et expérience  $+$ .



Le calcul de la vitesse de phase  $C_S$  des ondes à partir de la mesure de  $n$  et de la connaissance de  $k_1 a$  d'une résonance se fait simplement  $C_S = (k_1 a / n) C_1$  [25]. Dans des travaux récents [26,27] on montre la grande similitude existant entre un "Spectre des Résonances" expérimental (fig. 4a) et un spectre calculé (fig. 4b) à partir de la R.S.T par une analyse théorique du régime transitoire à l'aide des transformées de Laplace.



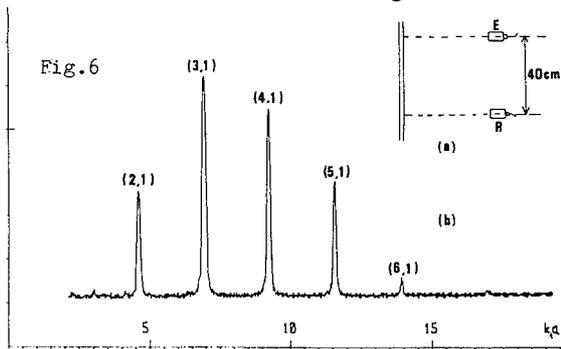
Nous donnons (fig. 5) le "Spectre des Résonances" (tube d'Alu.  $b/a = 0,90$ ) obtenu par T.F.D de la réponse temporelle mémorisée après une seule impulsion incidente de  $0,5 \mu s$ . Dans ce cas, l'écho provenant de la contribution rigide a été supprimé.



### 2.2 Ondes guidées selon l'axe des cibles

Dans les signatures que constituent les "Spectres des Résonances", des raies "supplémentaires" apparaissent. L'étude qui leur a été consacrée, tant pour les cylindres massifs [28] que pour les tubes pleins d'air [29] a conduit, en examinant la propagation des ondes élastiques selon l'axe des objets, à comparer les modes propres calculés aux modes propres observés et à

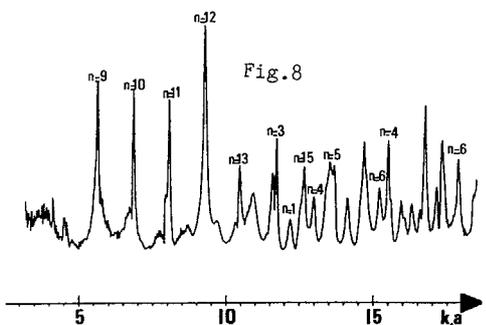
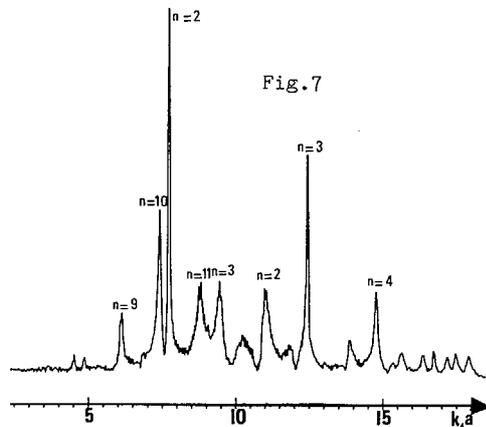
conclure à l'existence d'ondes guidées se propageant selon l'axe des cylindres. La figure 6 résume l'expérience de mise en évidence d'ondes guidées identifiées :



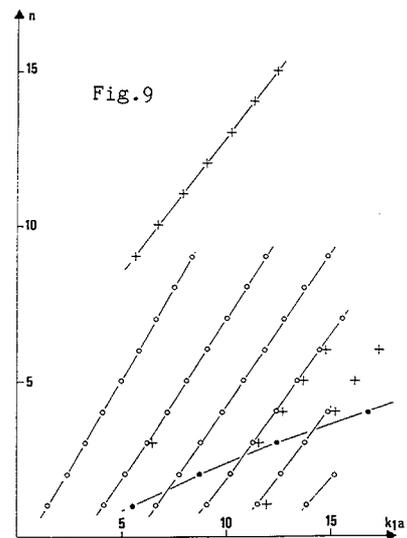
par la M.I.I.R (tube d'aluminium ;  $b/a = 0,9$ ). La figure 2b donne une identification d'une onde guidée ( $n = 3$ ). Ces ondes sont créées à partir de la zone d'impact du signal incident et interviennent dans la diffusion acoustique.

2.3 Tubes remplis de liquide

Les résonances apparaissant dans les "Spectres des Résonances" lorsque les tubes sont remplis d'eau ont été identifiées et classées par familles ; nous montrons que la colonne de liquide est responsable de plusieurs familles de résonances dans le domaine de fréquence exploré en accord avec les calculs des modes propres de la colonne de liquide. Une étude du même tube rempli de chloroforme a confirmé ces résultats. (fig. 7 : tube plein d'eau, fig. 8 : tube plein de

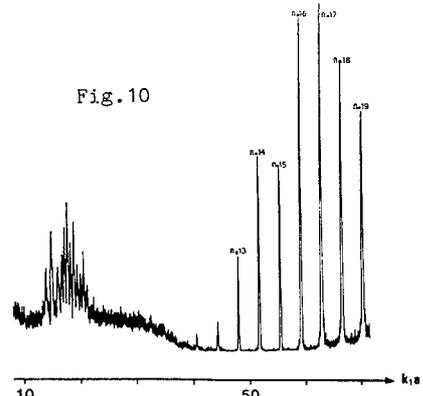


chloroforme, fig. 9 : courbe de Regge, tube  $b/a = 0,90$  plein de chloroforme ;  $\circ$  calculé ;  $+$  mesuré).

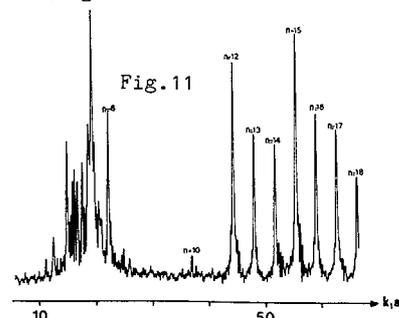


3 OBJETS ACTIFS

Le modèle étudié est constitué d'un tube d'acier inoxydable ( $b/a = 0,94$ ) à l'intérieur duquel, et contre sa paroi, est placé un transducteur - émetteur cylindrique. Le récepteur est à l'extérieur du tube. La M.I.I.R est tout d'abord utilisée comme pour l'étude des objets passifs avec une insonation externe afin d'obtenir le "Spectre des Résonances" (la source interne restant inactive) (fig. 10). Lorsque la source



interne est active et excitée par un signal de longue durée (800  $\mu$ s) l'observation faite par le récepteur extérieur (30  $\mu$ s après la fin du régime forcé) donne un spectre (fig. 11) très voisin de celui obtenu



lorsque la cible est insonée de l'extérieur. Les résonances identifiées par la M.I.I.R appartiennent à la série  $l = 2$ . On distingue aux basses fréquences un massif de raies très serrées dont certaines appartiennent à la série  $l = 2$  et d'autres à des ondes de type Scholte - Stoneley. L'étude est en cours.

Lorsque la source interne est active et excitée par un signal unique de courte durée (2  $\mu$ s), la méthode impulsionnelle est mise en oeuvre. L'unique réponse



temporelle est enregistrée par un échantillonneur rapide. On supprime le premier écho directement rayonné et le traitement par T.F.D donne le "Spectres des Résonances" (fig. 12). L'identification peut également être

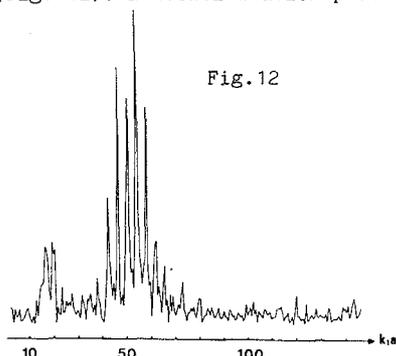


Fig.12

réalisée à l'aide de quelques spectres compte tenu des propriétés de symétrie des diagrammes d'identification.

#### CONCLUSION

La M.I.I.R, par une étude harmonique ou son extension par une étude impulsionnelle utilisant la T.F.D, permet d'obtenir une véritable signature des objets. Cette signature peut être obtenue, soit par une insonation externe, soit par une excitation interne. Les résultats expérimentaux ont été comparés aux résultats donnés par le calcul des modes propres et par les calculs mis en oeuvre en Diffusion Acoustique. L'étude des signatures peut être étendue à d'autres objets : sphères, fibres, plaques, coques variées, ... qu'ils soient passifs ou actifs, montrant tout l'intérêt des méthodes présentées pour la compréhension des phénomènes physiques et pour l'évaluation quantitative non destructive. Ce travail est soutenu par la D.R.E.T (Paris).

- [1] J.J. FARAN, J. Acoust. Soc. Am., 1951, 23, 405.
- [2] R. HICKLING, J. Acoust. Soc. Am., 1962, 34, 1582.
- [3] L. FLAX, L.R. DRAGONETTE, H. ÜBERALL, J. Acoust. Soc. Am., 1978, 63, 723.
- [4] L. FLAX, G.C. GAUNAURD, H. ÜBERALL, Theory of Resonance Scattering, dans "Physical Acoustics", XV, 121, Academic Press, New-York, 1981.
- [5] H. ÜBERALL, Huit conférences au "2<sup>ème</sup> Colloque sur la diffusion acoustique des ondes ultrasonores" 4-7 décembre 1984, Paris ; Actes : "Traitement du signal", 1985, 2, 183...; S.K. NUMRICH, et al, J. Acoust. Soc. Am., 1986, 80, 1161.
- [6] D. BRILL, G.C. GAUNAURD, J. Acoust. Soc. Am., 1983, 73, 1448 ; 1984, 75, 1680 ; 1987, 81 1.
- [7] G. MAZE, J. RIPOCHE, Rev. Phy. Appl., 1983, 18, 319.
- [8] A. DEREM, J.L. ROUSSELOT, G. MAZE, J. RIPOCHE, A. FAURE, Acustica, 1982, 50, 39.
- [9] G. MAZE, J. RIPOCHE, A. DEREM, J.L. ROUSSELOT, Acustica, 1984, 55, 69.
- [10] C. GAZANHES et al, Acustica, 1983, 52, 265.
- [11] N.D. VEKSLER, Wave Motion, 1986, 8, 525, Proceed. Acad. Sci. Estonian, 1986, 35, 381.
- [12] M. FEKIH, G. QUENTIN, Phys. Letters, 1983, 96A, 379.
- [13] A. DEREM, Rev. CETHEDDEC 1979, 58, 43, ; 1980, NS 80 - 1, 221 ; 1982, 1 72.
- [14] D. BRILL et al, J. Acoust. Soc. Am., 1982, 72, 1067 ; Acustica, 1983, 53, 11 ; H. ÜBERALL et al, Wave Motion, 1983, 5, 307.
- [15] G. MAZE, B. TACONET, J. RIPOCHE, Phys. Letters, 1981, 84A, 309.
- [16] G. MAZE, J. RIPOCHE, Rev. Phys. Appl., 1983, 18, 319.
- [17] G. MAZE, J. RIPOCHE, J. Acoust. Soc. Am., 1983, 73, 41.
- [18] J. RIPOCHE, G. MAZE, J.L. IZBICKI, J. Nondestructive Evaluation, 1985, 5, 69.
- [19] L.R. DRAGONETTE, S.K. NUMRICH, L.J. FRANK, J. Acoust. Soc. Am., 1981, 69, 1186.
- [20] G. DEPRez, R. HAZEBROUK, Rev. CETHEDDEC, 1982, 72, 73.
- [21] M. de BILLY, J. Acoust. Soc. Am., 1986, 79, 219.
- [22] S.K. NUMRICH, N.H. DALE, L.R. DRAGONETTE, Advan. in Fluid - Structure Interaction, PVD, Vol. 78/AMD Vol 64, 59, Ed. G.C. EVERSTINE, M.K. AU-YANG, The Am. Soc. Mech. Eng., New-York, 1984.
- [23] P. DELESTRE, J.L. IZBICKI, G. MAZE, J. RIPOCHE, Acustica 1986, 61, 83.
- [24] I. MOLINERO, M. de BILLY, G. QUENTIN, Appl. Phys. Letters, 1986, 49, 693.
- [25] G. MAZE, J. RIPOCHE, A. DEREM, J.L. ROUSSELOT, Acustica, 1984, 55, 69.
- [26] R. BURVINGT, J.L. ROUSSELOT, A. DEREM, G. MAZE, J. RIPOCHE, Rev. CETHEDDEC, Ondes et signal, 1984, 78, 73.
- [27] R. BURVINGT, Wave Motion, 1986, 8, 349.
- [28] G. MAZE, J.L. IZBICKI, J. RIPOCHE, J. Acoust. Soc. Am., 1985, 77, 1352.
- [29] J.L. IZBICKI, G. MAZE, J. RIPOCHE, J. Acoust. Soc. Am., 1986, 80, 1215.