

Quarante ans de diffusion acoustique d'objets immergés

G. Maze

▶ **To cite this version:**

G. Maze. Quarante ans de diffusion acoustique d'objets immergés. C F A / V I S H N O 2 0 1 6, Apr 2016, Le Mans, France. hal-01951905

HAL Id: hal-01951905
https://normandie-univ.hal.science/hal-01951905

Submitted on 11 Dec 2018

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.

CFA/VISHNO 2016

Quarante ans de diffusion acoustique d'objets immergés

G. Maze
LOMC UMR CNRS 6294, Université du Havre, 75 rue Bellot, 76600 Le Havre, France
gerard.maze@univ-lehavre.fr



La diffusion acoustique a débuté dans les années 1970 au Laboratoire. L'équipe, qui se formait sous la direction du Professeur Jean Ripoche, a étudié la diffusion acoustique par des cylindres et des tubes en incidence normale puis oblique. Ces études ont permis la mise au point de la Méthode d'Isolement et d'Identification des Résonances (MIIR) qui corrobore la Resonance Scattering Theory développée aux USA. Cette méthode expérimentale se décompose en deux étapes: (i) le tracé de spectres de résonnances et (ii) le tracé de diagrammes angulaires permettant d'identifier les modes de résonnances. Grâce aux coopérations développées avec André Derem et Jean-Marc Conoir, nous avons pu comprendre les mécanismes de la diffusion qui associe les résonances aux ondes circonférentielles générées en incidence normale ou aux ondes hélicoïdales générées en incidence oblique. L'équipe s'est, alors, penchée sur l'étude de la diffusion par des cibles cylindriques de longueur limitée, fermées par des disques ou des hémisphères et excitées sous tous les angles. L'équipe a par la suite étudié l'influence sur la diffusion d'un raidisseur longitudinal avec une équipe estonienne et de raidisseurs transversaux et périodiques avec Thales et la DCNS.

1 Introduction

La diffusion acoustique a débuté dans les années 1970 au laboratoire LEAH (laboratoire d'Electronique et d'Automatique du Havre). Le premier sujet développé concernait la réflexion d'un faisceau acoustique limité sur une surface métallique plane. La génération d'une onde de Rayleigh a été mise en évidence afin d'expliquer l'étalement du faisceau réfléchi pour un angle légèrement supérieur au second angle critique [1]. Par la suite, l'équipe qui se formait a étudié la diffusion acoustique par des cylindres et des tubes en incidence normale puis oblique. Ces études ont permis la mise au point de la Méthode d'Isolement et d'Identification des Résonances (MIIR) [2] qui corrobore la Théorie de la Diffusion Résonnante ou RST (Resonance Scattering Theory) développée aux USA par l'équipe du Professeur Herbert Überall [3]. Cette méthode expérimentale basée sur la mesure des signaux ultrasonores harmoniques diffusés dans le régime de vibration libre (après le régime de vibration forcée) se décompose en deux parties: la première consiste à tracer des spectres mettant en évidence des pics de résonances sans le fond non résonnant : c'est l'Isolement des résonances; la seconde permet d'Identifier ces résonances en comptant dans les diagrammes angulaires les maximums de vibration qui correspondent au mode de la résonance. Grâce aux coopérations développées avec des théoriciens français comme André Derem [4] et Jean-Marc Conoir [5], nous avons pu comprendre les mécanismes de la diffusion. Les résonances ainsi détectées et caractérisées sont reliées à des ondes circonférentielles générées en incidence normale ou des ondes hélicoïdales générées en incidence oblique formant des états stationnaires sur la circonférence des tubes [6]. D'autres chercheurs ont étudié également la diffusion par des objets de forme sphérique [7, 8].

Après avoir compris les mécanismes de la diffusion acoustique par des tubes de longueur infinie, l'équipe du LAUE (Laboratoire d'Acoustique Ultrasonore et d'Electronique), qui succédait au LEAH après son intégration au CNRS, s'est penchée sur l'étude de la diffusion par des cibles cylindriques de longueur limitée, fermées par des disques ou des hémisphères et excitées sous tous les angles [9-11]. Cette méthode spectroscopique permet de détecter et de caractériser, par exemple, de telles cibles enfouies dans de la vase [12]. L'équipe a par la suite étudié l'influence sur la diffusion d'un raidisseur longitudinal avec une équipe de l'université de technologie de Tallinn en Estonie animée par les Professeurs J. Metsaveer et A. Klauson [13]. Ces travaux ont également permis de répondre à des demandes d'étude des sociétés Thales et DCNS sur la diffusion par des tubes raidis périodiquement et transversalement. Cette étude a permis de mettre en évidence des phénomènes de Bragg et de Bloch-Floquet [14]. Celle-ci est encore en cours et son but est d'améliorer la discrétion acoustique des objets sous-marins.

2 Méthode d'Isolement et d'Identification des Résonances (MIIR)

Dans cette étude le cylindre ou le tube rempli d'air est immergé dans une cuve cylindrique (diamètre: 3m, hauteur: 2m) remplie d'eau douce. L'onde acoustique incidente générée par un transducteur large bande peut être considérée comme plane pour la cible dont le rayon a est compris entre 2 et 30 mm. Elle insone le cylindre normalement à son axe. Ce signal acoustique d'excitation est constitué d'un train de sinusoïde d'une durée suffisante pour qu'un régime stationnaire s'établisse dans la circonférence de la cible.

2.1 Isolement et identification des résonances en incidence normale à l'axe

Le signal rétrodiffusé par la cible est mesuré par le transducteur émetteur fonctionnant en récepteur au travers d'une porte analogique. Le signal reçu après amplification est visualisé sur un oscilloscope (Fig. 1).

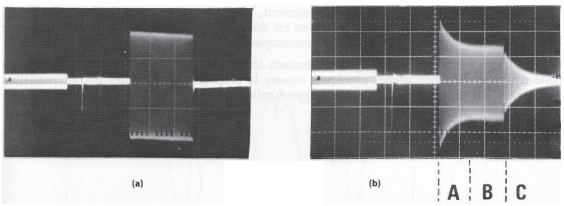


Figure 1: Signal temporel rétrodiffusé, (a) en dehors d'une résonance ; (b) pour une résonance.

Deux possibilités sont alors possibles lorsque la fréquence évolue progressivement ; (i) Soit l'amplitude du signal est mesurée dans le régime forcé, le spectre obtenu est le spectre de rétrodiffusion comparable à la fonction de forme calculée (Fig. 1(b) B) ; (ii) Soit l'amplitude du signal est mesuré dans le régime libre après la fin du régime forcé et alors le spectre de résonance est tracé (Fig. 1(b) C). Ce dernier spectre fait apparaître des pics de résonances qui sont en relation avec les variations d'amplitude du spectre de rétrodiffusion. Cette partie de l'étude est l'isolement des

résonances. La figure 2(A) montre le spectre de rétrodiffusion et la figure 2(B) le spectre de résonance.

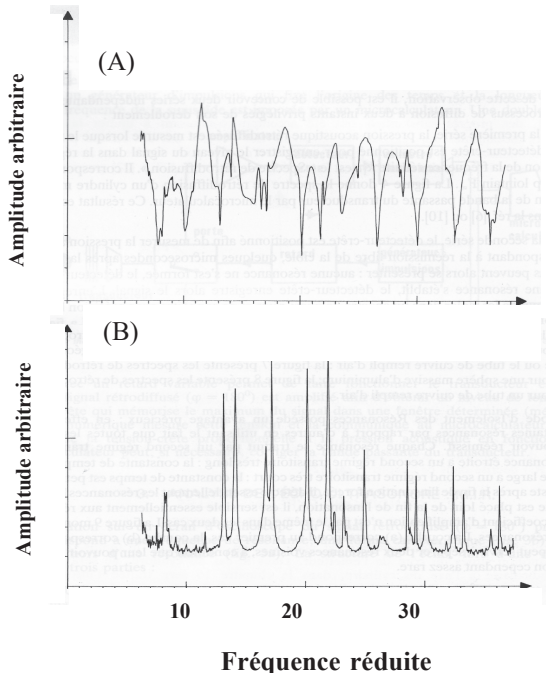


Figure 2: (A) spectre de rétrodiffusion, (B) spectre de résonance.

Dans un second temps la fréquence du signal est celle d'un des pics de résonances. Un second transducteur fonctionnant en récepteur enregistre le signal acoustique. Il peut tourner autour de la cible à distance constante de son axe. L'amplitude du signal est mesurée dans le régime libre après la fin de l'excitation forcée en fonction de l'angle d'incidence. La figure 3 montre deux exemples de diagrammes angulaires ainsi obtenus. Le nombre de lobes correspond à deux fois le mode de la résonance. Dans une circonférence, il se forme un nombre entier de périodes lors d'une résonance.

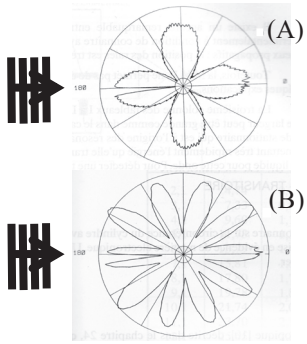


Figure 3: Diagrammes angulaires résonnants (A) : mode ***n***=2 ; (B) : mode ***n***=5.

2.2 Isolement et identification des résonances en incidence oblique à l'axe

Dans le cas d'une excitation en incidence oblique, l'analyse des résultats montre qu'il existe d'autres types de résonances qui sont liés à des ondes guidées dans la coque [15, 16]. La méthode harmonique a été utilisée tout en l'adaptant. La figue 4 (A) montre la méthode de mesure avec un transducteur émetteur, un transducteur récepteur en position dans le faisceau réfléchi et un transducteur légèrement décalé qui permet de mesurer la réémission des ondes guidées. Le signal ainsi détecté est présenté sur la figure 4(B). Ce signal est constitué de trois parties : la partie I qui correspond à certaines ondes guidées alors que la partie III correspond d'autres ondes guidées. La partie II est une interférence des deux autres parties.

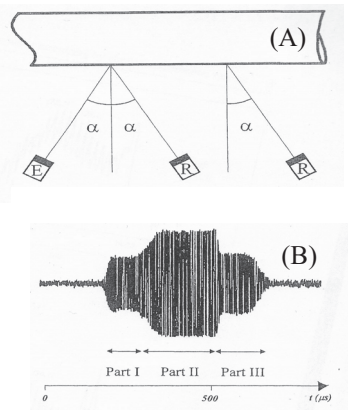


Figure 4 : (A) méthode de mesures, (B) signal temporel lié aux ondes guidées.

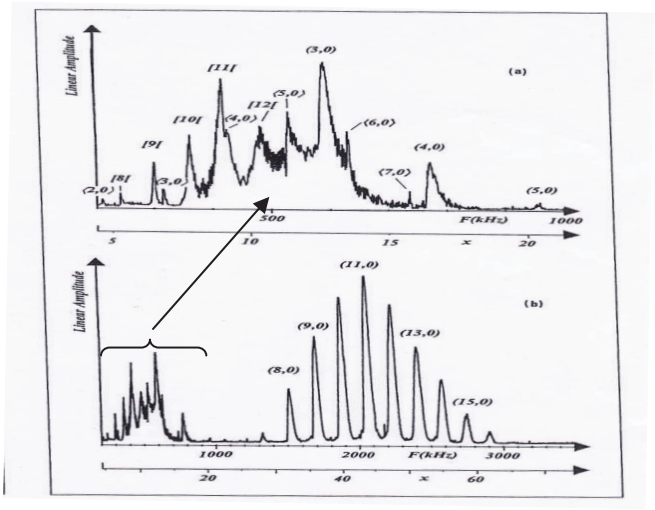


Figure 5: Spectre de résonance pour une incidence α = 5° ; (A) : Loupe en basse fréquence réduite (5<ka<20) ; (B) : signal total dans la bande 7-75.

La figure 5 montre le spectre de résonance mesuré dans les conditions indiquées sur la figure 4(B). Les résonances de l'onde ***A*** sont indiquées par [***n***[. Elles sont observées dans la bande de fréquence réduite 5<ka<20. Les résonances de l'onde S_0 sont indiquées par (n,0) et les résonances de l'onde guidée T_0 sont indiquées par <n,0>.

3 MIIR impulsionnelle

3.1 Tube de longueur infinie

Dans le paragraphe précédent les spectres étaient obtenus en utilisant un train de sinusoïde de longue durée afin d'avoir un état stationnaire dans la circonférence du tube. Pour simplifier l'étude, il est possible d'utiliser des impulsions brèves de type Dirac à l'émission. Le signal rétrodiffusé est alors constitué d'une multitude d'échos: un écho très intense spéculaire qui correspond au signal réfléchi et des échos d'amplitude plus faible qui sont associables à la réémission des ondes circonférentielles se propageant autour de la coque. La figure 6 montre un tel

signal temporel. Les différents échos sont identifiés comme étant liés à un phénomène physique.

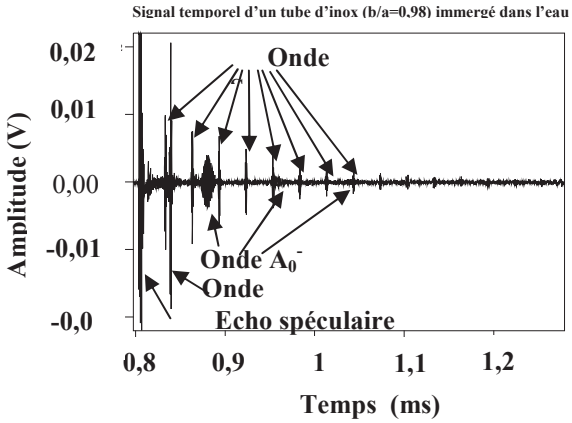


Figure 6: Signal temporel diffusé par un tube de rapport des rayons interne sur externe b/a=0,98.

Pour obtenir le spectre de rétrodiffusion il suffit de calculer la transformée de Fourier de ce temporel.

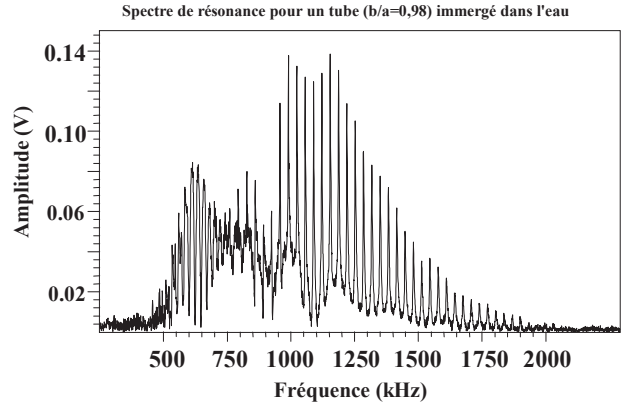


Figure 7: Spectre de résonance d'un tube de rapport des rayons (b/a=0,98).

Pour obtenir le spectre de résonances, le signal spéculaire est remplacé par des zéros et la transformée de Fourier est appliquée au nouveau temporel. La figure 7 montre le spectre de résonance. Les résultats obtenus par cette MIIR impulsionnelle sont obtenus avec plus de facilités qu'avec la méthode harmonique. La mesure est applicable hors du laboratoire car simple et rapide.

3.2 Tube de longueur limitée

Dans la pratique, les cibles rencontrées sont de longueur limitée. La limitation en longueur des tubes montre qu'il existe pour un mode circonférentiel ***n*** plusieurs modes de longueur ***m*** qui ont été identifiés expérimentalement [10, 15]. La figure 8 compare les trajectoires des résonances calculées (A2) et mesurées (A1) dans le cas d'un tube rempli d'air et immergé dans l'eau avec un rapport des rayons *b/a*=0,83 et un rapport longueur sur de *L/a*=10,83. La discontinuité des trajectoires est due aux modes de longueur. Elle indique également les identifications des modes ***n*** calculés (B2) et mesurés (B1) pour un angle d'incidence de 21°.

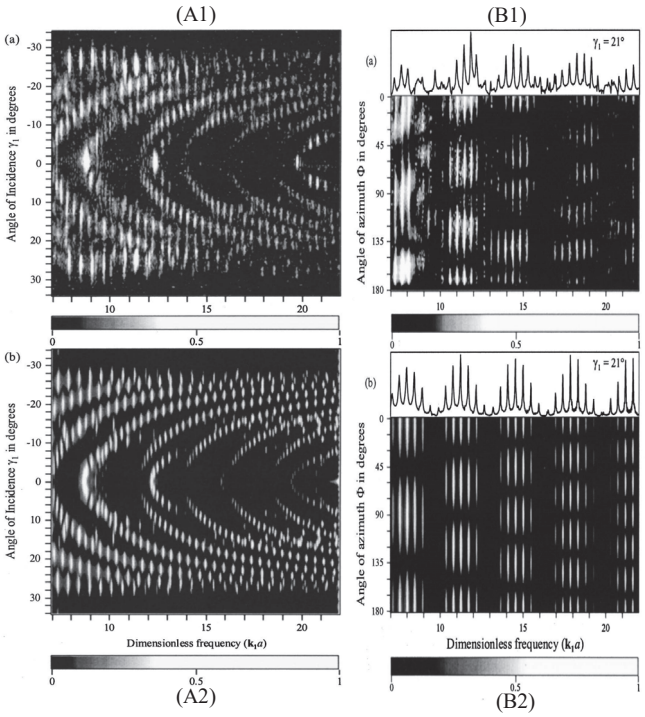


Figure 8 : Trajectoires des résonances en fonction de l'angle d'incidence, [(A1) mesures, (A2) calculs]. Identifications des modes circonférentiels ***n*** pour une incidence de 21°, [(B1) mesures, (B2) calculs].

La figure 9 montre les identifications expérimentales faites sur la longueur du tube limité. Le mode ***m*** indique le nombre de demi-longueurs d'onde dans la longueur du tube.

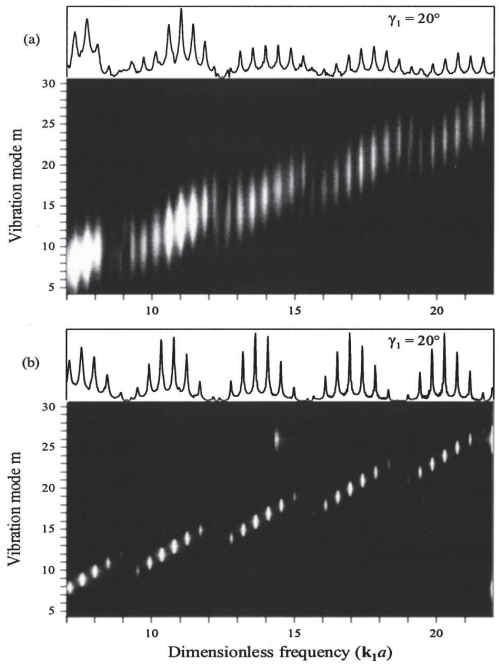


Figure 9: Identification du mode ***m*** sur la longueur du tube limité pour un angle d'incidence de 20°. (a) résultats expérimentaux et (b) résultats théoriques.

4 Diffusion acoustique par des tubes raidis

4.1 Raidisseur longitudinal

Les différentes techniques développées ont permis d'étudier théoriquement et expérimentalement la diffusion acoustique par des tubes possédant un raidisseur longitudinal soudé le long de la paroi interne du tube sur toute sa longueur. L'étude a été menée uniquement en incidence normale à l'axe [13].

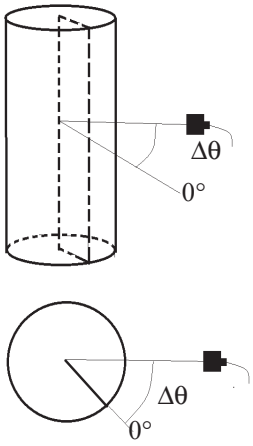


Figure 10: Conditions de la mesure pour un tube muni d'un raidisseur longitudinal.

La figure 11 montre la pression acoustique mesurée à l'aide de la MIIR harmonique dans la queue de vibration comme il a été montré précédemment en fonction de la fréquence réduite ***kR*** (***R*** rayon moyen du tube) pour différents angles d'incidence. La mesure (Fig.11(A)) est comparée au calcul utilisant la théorie des coques minces (Fig. 11(B)).

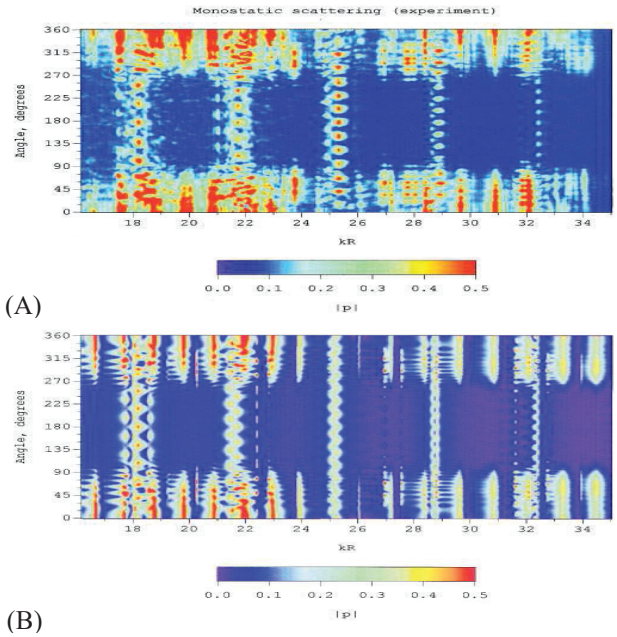


Figure 11: Spectres de résonance en fonction de la fréquence réduite ***kR*** pour différents angles d'incidence.

L'analyse de ces figures montre qu'il existe trois types de résonance. Le premier type correspond à une série de pics ayant une amplitude maximale à $\Delta\theta = 0°$ en face du raidisseur, cette amplitude diminuant fortement pour $\Delta\theta$ tendant vers 90°. Ces résonances sont dues à l'interaction de la vibration de flexion symétrique de la coque avec la vibration radiale du raidisseur. Le second type de résonances ont une amplitude minimale pour $\Delta\theta = 0°$ et maximale pour $30° < \Delta\theta < 70°$. Ces résonances sont dues à l'interaction de la vibration antisymétrique de la coque avec la vibration de flexion du raidisseur. Le troisième type de résonance est visible sur toutes les directions angulaires et sont largement espacées. Elles sont dues à l'interaction de l'onde de membrane de la coque avec la vibration transversale du raidisseur.

4.2 Raidisseurs transversaux et périodiques

Dans ce paragraphe est traitée la diffusion acoustique par une plaque plane munie de 20 raidisseurs avec une période de 1,5 cm, La face lisse est en contact avec l'eau alors que la face comportant les raidisseurs est dans l'air. Le transducteur émetteur large bande à une fréquence centrale de 200 kHz. Il tourne autour du centre de la plaque qui est positionnée verticalement dans un plan perpendiculaire à cette plaque. Les signaux temporels sont enregistrés tous les 1° sur 180°, Chaque signal est soumis à une transformée de Fourier et tous les spectres sont assemblés de manière à obtenir une image en niveau de gris. La figure 12 montre le résultat obtenu. Il faut noter la présence de trajectoires en gris plus foncé de deux types. Les premières sont désignées par les trajectoires de Bragg et les secondes sont les trajectoires de Bloch-Floquet. Les trajectoires de Bragg sont dues aux interférences des réémissions liées à la présence des raidisseurs. Chaque raidisseur se comporte comme une source acoustique dans toutes les directions. Les trajectoires de Bloch-Floquet sont dues aux interférences entre les différentes réémissions des raidisseurs mais pour celles-ci une propagation d'une onde de flexion ***A*** dans la plaque entre raidisseurs s'établit modifiant ainsi les directions d'interférences constructives formant les trajectoires de Bloch-Floquet.

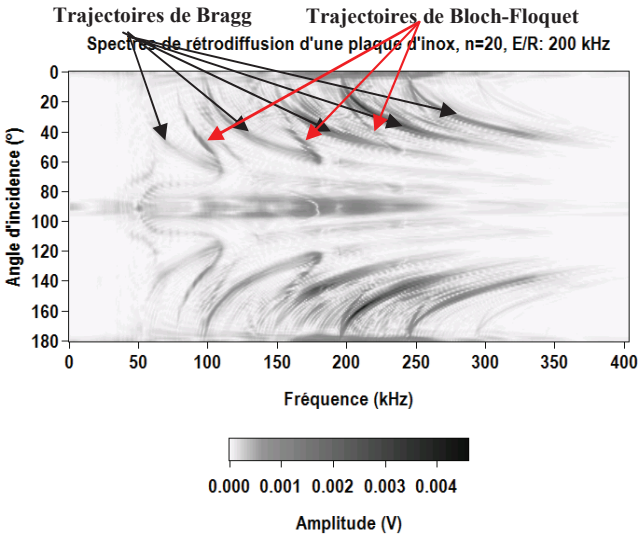


Figure 12: Plan spectral des signaux diffusés par une plaque d'acier inoxydable plane comportant 20 raidisseurs.

Ce même type d'étude a été réalisé pour un tube d'acier inoxydable (b/a=0,98) de diamètre 10 cm et de 75 cm de

longueur comportant 49 raidisseurs distants de 1,5 cm [14]. La figure 13 montre le plan spectral obtenu, Des trajectoires de Bragg et de Bloch-Floquet sont présentes. Toutefois il faut noter que seule une génératrice de la coque est en cause pour les deux phénomènes.

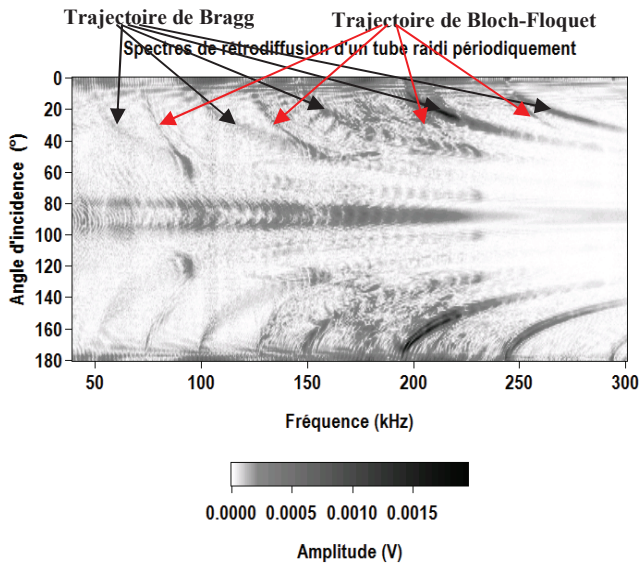


Figure 13: Plan spectral des signaux diffusés par un tube d'acier inoxydable comportant 49 raidisseurs transversaux.

5 Détection d'un tube enfoui dans du sable très fin

Une des applications de la MIIR a été de permettre de détecter une cible cylindrico-hémishérique entièrement recouverte par du sable très fin (50 µm) [12]. Elle est située à deux fois son rayon sous l'interface eau-sable parallèlement à cette surface. La figure 14 montre le montage expérimental.

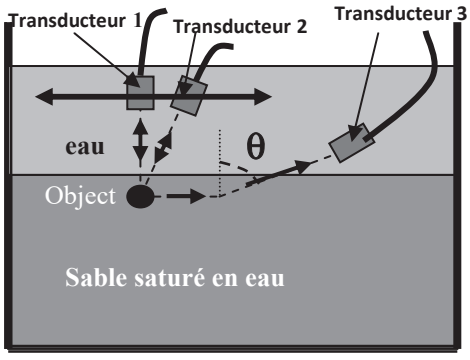


Figure 14: Montage expérimental pour détecter une cible enfouie.

La figure 15 compare le spectre de résonance obtenu en plein eau et le spectre de résonance mesuré lorsque la cible est enfouie sous deux fois son rayon. Le transducteur 1, large bande, est utilisé. Sa fréquence centrale est 500 kHz. Dans ce dernier cas en plus du signal spéculaire, le signal de réverbération sur l'interface eau-sable a été remplacé par des zéros.

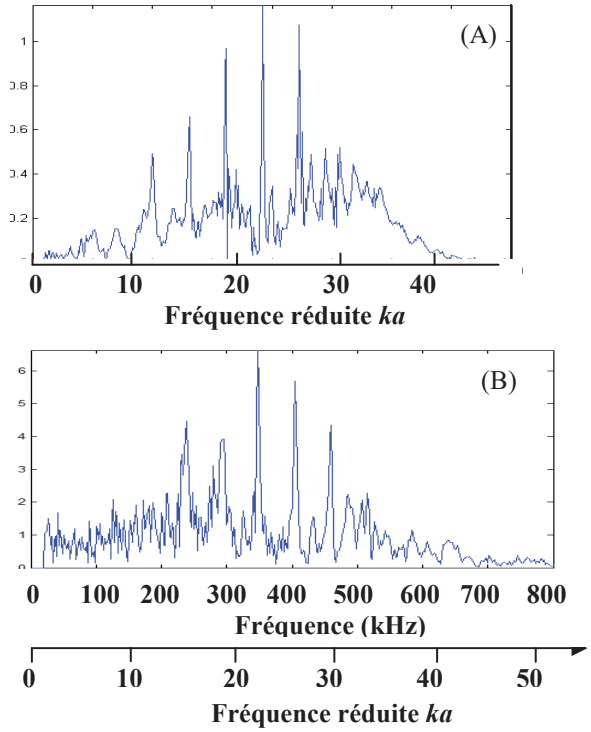


Figure 15: (A) : spectre de résonance de la cible en plein au ; (B) : spectre de la cible enfouie dans le sable gorgé d'eau.

Sur la figure 15 les résonances formées à partir de l'onde S_0 sont bien isolées. Les résonances formées à partir de l'onde A sont difficiles à repérer. Il est possible d'utiliser le transducteur 2 afin de minimiser l'écho de réverbération. Le spectre obtenu est comparable à celui présenté sur la figure 15(B). Une méthode bistatique peut être aussi utilisée. Le transducteur 1 est l'émetteur et le transducteur 3 le récepteur. Ce dernier transducteur se déplace perpendiculairement à l'axe de la cible, Pour chaque position un signal temporel est relevé. Une transformation de Fourier est appliquée afin d'obtenir le plan fréquentiel en niveau de gris de la figure 16(A). Des taches plus foncées apparaissent au milieu de ce plan fréquentiel. La figure 16(B) montre le spectre central. Des résonances de l'onde S_0 sont parfaitement isolées. Pour expliquer ce résultat, le transducteur 1 excite les résonances dans la cible. Ces résonances transmettent une partie de leur énergie dans le sable saturé en eau sous la forme d'une onde suivant l'interface eau-sable et réémet de l'énergie progressivement sous angle critique dans la direction du transducteur 3.

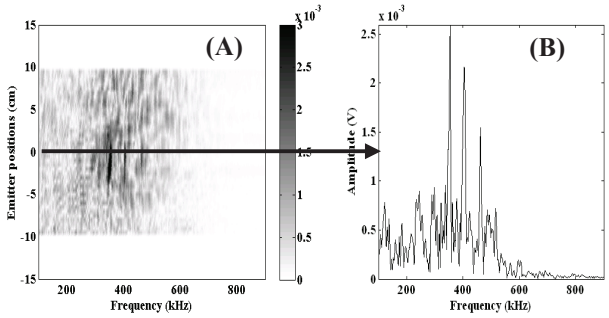


Figure 16: résultat de la méthode bistatique pour détecter une cible enfouie ; (A) : Plan fréquentiel en niveau de gris; (B) : un exemple de spectre de résonance.

7 Conclusion

Cette présentation décrit les avancées de la diffusion acoustique pour détecter et caractériser des cibles construites par l'homme. Les spectres de résonance qui sont plus faciles à utiliser que les spectres de rétrodiffusion permettent d'obtenir des informations sur la structure des cibles qu'elles soient cylindriques, sphériques ou cylindro-hémisphériques. Il est aisé de distinguer des tubes de rapports des rayons différents en analysant la position des résonances de l'onde ***A*** qui se situent dans une bande de fréquence limitée qui se translate vers les hautes fréquences quand le rapport des rayons tend vers 1. Il est possible également de détecter des cibles métalliques enfouies dans de la vase gorgée d'eau. La diffusion acoustique peut également être utilisée pour faire du contrôle non destructif sans contact. Par exemple, des fissures ou des concrétions sur des pales d'hydroliennes immergées peuvent être détectées et caractérisées. Des nouvelles applications de la diffusion acoustique passive peuvent être également développées, par exemple, la mesure des bruits rayonnés par des champs d'éoliennes marines. Dans ce cas il s'agit, connaissant les modes de propagation dans les pieux supportant ces éoliennes, d'identifier ces sons et développer des méthodes pour les atténuer.

Remerciements

L'auteur souhaite remercier tout particulièrement Bernard Poirée de la Direction des Etudes et Recherches Techniques (DRET) de la DGA qui a su fédérer de nombreuses équipes de théoriciens et d'expérimentateurs, universitaires et industriels, pour obtenir des avancées importantes, en diffusion acoustique, reconnues dans le monde entier. L'auteur souhaite également remercier le Professeur Ripoche qui a créé et animé pendant de nombreuses années le laboratoire du Havre. Qu'il me soit également permis de remercier tous mes collègues du laboratoire avec lesquels j'ai pu travailler dans les meilleures conditions, collègues enseignants chercheurs, chercheurs et techniciens. Je souhaite également remercier les doctorants qui ont travaillé sous ma responsabilité et sans lesquels une grande part des résultats n'aurait pu être obtenue. Je pense sincèrement que la médaille de la SFA qui m'a été décerné m'honore mais honore également tous ceux qui ont travaillé à mes côtés durant ces quarante ans,

7 Références

[1] G. Maze, J. Duclos, J. Ripoche, Approche électronique et optique des phénomènes de réflexion des ondes ultrasonores à l'interface liquide-métal, Acustica, International Journal on Acoustics 32, 181-186, (1975).

[2] G. Maze, J, Ripoche, Méthode d'Isolement et d'Identification des Résonances (M.I.I.R.) de cylindres et de tubes soumis à une onde acoustique plane dans l'eau, Revue de Physique Appliquée. 18, 319-326, (1983).

[3] J.D. Murphy, E.D. Breitenbach, H. Überall, Resonance scattering of acoustic waves from cylindrical shells, J. Acoust. Soc. Am. 64, 677-683 (1978).

[4] A. Derem, Théorie de la matrice S et transformation de Sommerfeld-Watson dans la diffusion acoustique, Ch, 9, La Diffusion Acoustique, Théories et expériences, N, GESPA, Cedocar, (1987).

[5] J.-M. Conoir, P, Rembert, O, Lenoir, J.-L. Izbicki Relation between surface helical waves and elastic cylinders resonances, J. Acoust. Soc. Am. 93, 1300-1307, (1993).

[6] G. Maze, F. Léon, N. Veksler, Scattering of an obliquely incident plane acoustic wave by circular cylindrical shell, Acustica-Acta Acustica 84, 1-11, 1997.

[7] J. J. Faran, Sound scattering by solid cylinders and spheres, J. Acoust. Soc. Am. 23, 405-418 (1951).

[8] C. Gazanhes, J.-P. Sessarego, J.-P. Hérault, J. Léandre, fonctions de transfert et réponses impulsionnelles de spheres rigides et élastiques, Acustica, 52, 1-15, (1983).

[9] D. Décultot, F. Lecroq, G. Maze, J. Ripoche, Acoustic scattering from a cylindrical shell bounded by hemispherical endcaps. Resonances explanation with surface waves propagating in cylindrical and spherical shells, J. Acoust. Soc. Am. 94, 2916-2923, (1993).

[10] Nicolas Touraine, L. Haumesser, D. Décultot, G. Maze, A. Klauson, J. Metsaveer, Analysis of the acoustic scattering at variable incidences from an extra thin cylindrical shell bounded by hemispherical endcaps, J. Acoust. Soc. Am. 108, 2187-2195, (2000).

[11] L. Haumesser, A. Baillard, D. Décultot, G, Maze, Behavior of first guided wave on finite cylindrical shells of various lengths: Experimental investigation, J. Acoust. Soc. Am., 109, 583-590, (2001).

[12] D. Décultot, R. Liétard, G. Maze, Classification of a cylindrical target buried in a thin sand-water mixture using acoustic spectra, J. Acoust. Soc. Am. 127, 1328-1334, (2010).

[13] A, Klauson, J, Metsaveer, D, Décultot, G, Maze, J, Ripoche, Identification of the resonances of the cylindrical shell stiffened by internal lengthwise rib, J. Acoust. Soc. Am. 100, 3135-3142, (1996).

[14] R, Liétard, D, Décultot, G. Maze, M, Tran Van Nhieu, Acoustic scattering from a finite cylindrical shell with evenly spaced stiffeners: Experimental investigation, J. Acoust. Soc. Am., 118, 2142-2146, (2005).

[15] N. Veksler, G. Maze, J. Ripoche, V. Porochovskii, Scattering of obliquely incident plane acoustic wave by circular cylindrical shell. Results of computations, Acta Acustica 82, 689-697, (1996).

[16] L. Haumesser, D. Décultot, F. Léon, G. Maze, Acoustic scattering from a finite cylindrical shell at oblique incidence: Experimental identification along the shell length, J. Acoust. Soc. Am., 111, 2034-2039 (2002).