Diffusion acoustique par des cibles cylindriques : reconnaissance par signature spectrale

Gérard Maze, Dominique Decultot, Fernand Léon et Farid Chati LAUE UMR CNRS 6068

Université Le Havre-IUT Place Robert Schuman 76610 Le Havre France Tél. : 02 32 74 47 18 Fax : 02 32 74 47 19 http://www.univ-lehavre.fr

Résumé

Dans l'exploration du milieu marin, il est nécessaire de développer des méthodes qui permettent d'identifier des objets que les moyens optiques habituels ne peuvent révéler à cause du manque de lumière et de la turbidité du milieu. L'acoustique est l'un de ces moyens. La caméra acoustique est adaptée lorsque l'objet a une forme complexe avec de nombreux points diffusants. Si l'objet est de forme simple, tube ou sphère, elle est moins adaptée : un tube est vu comme une ligne et une sphère comme un point. Dans cette présentation, la description de la Méthode d'Isolement et d'Identification des Résonances (MIIR) impulsionnelle est faite pour des tubes métalliques immergés, remplis d'air et excités normalement à leur axe. Il est montré que les spectres de résonance ainsi obtenus dépendent de l'épaisseur et de la constitution de la coque. Il est montré, par ailleurs, qu'il est encore possible d'utiliser cette méthode lorsque le tube est enfoui dans la vase.

Abstract

Investigation of the underwater medium makes it necessary to develop methods which permit to identify objects that the usual optical means cannot reveal due to lack of light and water turbidity. Acoustics is one of these means. The acoustic camera is adapted if the object has a complex shape with several scattering points. If the object has a simple shape, tube or sphere, it is not so well adapted : a tube is seen as a line and a sphere as a point. In this presentation, the impulse Method of Isolation and Identification of Resonances (MIIR) is described for immersed airfilled metallic tubes insonified perpendicularly to their axis. The plotted resonance spectra depend on the thickness and the constitution of the shell. It is shown, in other respects, that it is still possible to use this method if the tube is embedded in sediment.

a conquête du milieu marin nécessite de mettre en œuvre des moyens d'observation de l'environnement aquatique. Le manque de lumière et la turbidité du milieu rendent la vision, par des moyens optiques (caméra vidéo) difficile, c'est pourquoi des méthodes acoustiques ont été développées.

Ces méthodes acoustiques se heurtent à diverses difficultés:

 l'atténuation impose de travailler à basse fréquence bien qu'à ces fréquences, la bande passante des sonars reste étroite.

 - s'il est possible d'obtenir des images avec des caméras acoustiques lorsque ces objets ont des formes complexes; pour des objets de forme simple comme des tubes ou des sphères, c'est beaucoup plus difficile. En effet, un cylindre est représenté comme une ligne et une sphère comme un point.

Pendant que des chercheurs tentent d'améliorer les images acoustiques, d'autres étudient des méthodes physiques permettant de reconnaître des cibles de forme simple sans en donner une image. Ces méthodes mettent en jeu les résonances des objets. L'idée de départ est venue en écoutant les cloches de nos églises ou le verre de cristal que l'on frotte à la fin d'un bon repas. Le son de la cloche dépend fortement de sa dimension et de sa forme; plus elle est grosse, plus le son est grave et plus elle est petite, plus le son est aigu. Une oreille bien entraînée est capable de reconnaître le son d'une cloche particulière. Pour la reconnaissance des objets sous-marins, il est possible d'appliquer le même principe; une excitation de l'objet par une onde acoustique appropriée permet de le faire résonner et le son diffusé, traité convenablement, permet de le caractériser.

Pour comprendre complètement le mécanisme de la diffusion par des tubes métalliques plongés dans l'eau il est nécessaire de connaître les différentes propagations qui s'établissent dans ces objets excités par une onde acoustique [1]. Dans le cas de tubes métalliques plongés dans l'eau, remplis d'air et excités perpendiculairement à leur axe, des ondes circonférentielles sont générées dans la coque [2], elles sont comparables aux ondes de Lamb dans des plaques planes [3] {voir encadré}.

Ondes de Lamb dans des plaques minces

Dans un matériau solide de grandes dimensions, deux types d'ondes de volume peuvent se propager de manière indépendante : les ondes à vibration longitudinale et les ondes à vibration transversale (fig. 1), ces deux propagations ne sont pas couplées. La vitesse de ces ondes de volume est indépendante de la fréquence. Dans un métal courant comme l'acier ou l'aluminium, la vitesse des ondes à vibration longitudinale (CI) est voisine de 6000 m/s et la vitesse des ondes à vibration transversale (Ct) est voisine de 3000 m/s.

Dans une plaque plane de faible épaisseur, deux types d'ondes guidées peuvent se propager : les ondes de Lamb Antisymétriques Ai et les ondes de Lamb symétriques Si (fig. 2). Dans chaque type, il en existe une infinité (i = 0, 1,2...), elles se différencient par la structure vibratoire dans l'épaisseur de la coque. Des flèches sur la figure 2 montrent d'une part la direction de propagation et d'autre part la direction des vibrations, dans le cas des ondes de Lamb les vibrations sont elliptiques, les vibrations longitudinales et les vibrations transversales ne sont plus indépendantes mais couplées. La vitesse de phase des ondes de Lamb dépend fortement de la fréquence comme le montre la figure 3. Ces ondes sont dites dispersives, la fréquence réduite sur l'axe des abscisses est ktd avec kt le nombre d'onde de l'onde à vibration transversale (kt = 2pF/Ct) et d la demie épaisseur de la plaque, pour plus d'information vous pouvez consulter l'ouvrage de I. A. Viktorov (Rayleigh and Lamb Waves, Plenum Press, New York, 1967).

Il existe une infinité de ces ondes qui se différencient essentiellement par leur structure vibratoire sur l'épaisseur. Deux familles d'ondes de Lamb sont observables: les ondes à vibration symétrique (S_i) par rapport au plan moyen de la plaque et les ondes à vibration antisymétrique (A_i), la tôle se déforme comme un serpent. Les vitesses de ces ondes, contrairement aux ondes de volume longitudinales et transversales rencontrées dans les solides massifs dépendent fortement de la fréquence, elles sont dites dispersives. L'ensemble de ces ondes vont nous permettre d'expliquer les résultats obtenus sur les tubes. Pour comprendre complètement le comportement de ces ondes dans une coque plongée dans l'eau, il faut savoir qu'elles ont une polarisation de type elliptique, il existe une composante vibratoire perpendiculaire à la surface et une autre parallèle à la surface. Si la composante normale à la surface est grande, des échanges importants d'énergie se font entre le solide et le fluide, au contraire si la composante parallèle est grande, elle se propage avec peu d'échange et peut ainsi parcourir dans la coque cylindrique un grand nombre de circonférences.

Dans une première partie, la Méthode d'Isolement et d'Identification des Résonances impulsionnelle [4-6] est décrite. Celle-ci permet d'obtenir expérimentalement deux types de spectres acoustiques: le spectre de rétrodiffusion et le spectre de résonance. Ces spectres correspondent à la réponse vibratoire d'un tube métallique, rempli d'air, plongé dans l'eau et excité normalement à son axe par une impulsion ultrasonore très brève. Dans une seconde partie, des spectres calculés sont présentés montrant la possibilité de reconnaissance de tubes. L'épaisseur de coque et la constitution des tubes sont considérées. Enfin, dans une dernière partie, une application de cette méthode est développée pour détecter et reconnaître un tube enfoui dans du sable très fin modélisant un sédiment.

Méthode d'Isolement et d'Identification des Résonances: MIIR

Le tube, de grande longueur devant les longueurs d'ondes, est plongé verticalement dans une cuve remplie d'eau douce (fig. 1) dans laquelle les ondes acoustiques se propagent à la vitesse $C_{eau} = 1470$ m/s.



Fig. 1: Cuve d'expérimentation

Le tube est en acier inoxydable, son rayon externe est **a** = 6 cm et le rapport des rayons interne **b** sur externe **a** est **b/a** = 0,98. La vitesse de l'onde à vibration longitudinale dans l'acier inoxydable est **C**_L = 5970 m/ s et la vitesse de l'onde à vibration transversale est **C**_T = 3100 m/s. Ce tube est excité par une impulsion acoustique brève émise par un transducteur large bande. Le signal après diffusion par le tube est capté par le même transducteur fonctionnant en récepteur et est transmis à un micro-ordinateur afin d'être traité. La bande passante de l'impulsion acoustique générée par le transducteur de fréquence centrale 1 MHz est donnée sur la figure 2a. 2



Fig. 2: a) Bande passante du transducteur de fréquence centrale 1 MHz,
b) Signal temporel obtenu à partir d'un tube d'acier inoxydable de rapport des rayons b/a = 0,98 en incidence normale



Fig. 3: a) Spectre de rétrodiffusion, b) Spectre de résonance du tube d'acier inoxydable b/a = 0,98

Le signal temporel, enregistré après diffusion par le tube, est présenté sur la figure 2b. À gauche de cette figure, l'écho spéculaire de grande amplitude est lié à la réflexion sur le tube. les autres échos sont liés à la réémission progressive des ondes circonférentielles dans la coque au cours de leur propagation. Entre chaque écho, l'onde a fait le tour de la circonférence du tube. Il existe trois types d'échos qui sont liés soit à l'onde symétrique S_0 soit à l'onde antisymétrique A_0^- ou à l'onde antisymétrique A_0 + [7]. Les ondes S_0 et A_0 sont faiblement couplées à l'eau dans lequel le tube est plongé, l'amplitude des échos décroît progressivement par rayonnement lors de la propagation, l'onde A_0 + est au contraire fortement couplée à l'eau, un seul écho est observable (Fig. 2b).

Si une transformée de Fourier est appliquée à l'ensemble du signal de la figure 2b, un spectre de rétrodiffusion est obtenu (Fig. 3a). Sur cette dernière figure, la courbe moyenne suit la bande passante du transducteur. Des transitions apparaissent, elles sont liées à des résonances qui sont obtenues à partir des ondes circonférentielles lorsau'un nombre entier de longueurs d'onde est établi dans la circonférence du tube. Ce spectre n'est pas très aisé à exploiter dans la pratique, aussi, il est possible d'obtenir un autre spectre appelé spectre de résonance en supprimant dans le signal temporel (Fig. 2b) l'écho spéculaire. Un exemple de spectre de résonance mesuré à partir du tube précédent est donné sur la figure 3b.

Sur la figure 3b, les résonances apparaissent en pics bien isolés qu'il est possible d'identifier théoriquement et expérimentalement [1]. Les résonances appartiennent, dans le cas du tube considéré dans cette partie, à l'onde A_0^- en basse fréquence et S_0 en haute fréquence.

Influence du rapport des rayons

Les mesures précédentes ont été réalisées à partir d'un tube d'acier inoxydable de rapport des rayons $\mathbf{b/a} = 0.98$. Il est possible de calculer les spectres de résonances pour différents rapports des rayons. Pour cela, le calcul du spectre de la pression rétrodiffusée est effectué à l'aide de la formule mathématique suivante [6]:

$$P_{scat}(\omega) = P_0 \frac{1-i}{\sqrt{\pi k_1 r}} \exp\left(2k_1 a\right) \sum_{n=0}^{\infty} e_n \frac{D_n^{\dagger}(\omega)}{D_n(\omega)} \cos\left(n\theta\right)$$

dans laquelle ω est la fréquence angulaire, $\mathbf{k_1} = \omega / \mathbf{C_{eau}}$ est le nombre d'onde, $\mathbf{P_0}$ est la pression incidente, $\mathbf{D_n^1}(\omega)$ et $\mathbf{D_n}(\omega)$ sont les déterminants obtenus en tenant compte

des conditions de continuité aux interfaces et ϵ_n est le coefficient de Neumann ($\epsilon_n = 1 \, \sin n = 0$ et $\epsilon_n = 2 \, \sin n \neq 0$). Une transformée de Fourier inverse est appliquée sur ce spectre de rétrodiffusion. Sur le signal temporel obtenu, l'écho spéculaire lié à la réflexion sur le tube est supprimé. Sur le nouveau signal ainsi obtenu une transformée de Fourier est appliquée permettant d'obtenir le spectre de résonance. La méthode de calcul est comparable à la MIIR développée pour l'expérimentation.

La figure 4 présente quelques exemples de calcul pour des tubes ayant le même rayon extérieur ($\mathbf{a} = 3$ cm) mais différents rapports des rayons **b/a** (0,98, 0,94, 0,90 et 0,86).

Plusieurs remarques peuvent être faites:

- les résonances appartenant à l'onde ${\rm A_0^-}$ n'apparaissent pas dans le même domaine de fréquence, plus la coque est épaisse, plus cette bande glisse vers les basses fréquences;

- les autres résonances appartiennent à l'onde ${\bf S_0}$. La largeur des résonances n'est pas la même dans les 4 cas. L'amplitude relative de ces résonances dépend également du rapport des rayons, par exemple, il est possible de constater qu'une résonance de très faible amplitude, indiquée par une flèche sur la figure 4, est entourée de résonances plus intenses. Cette résonance s'observe au voisinage de la fréquence 230 kHz pour le tube

2



Fig. 4: Spectres de résonance de tubes ayant différents rapports des rayons b/a

b/**a** = 0,94, au voisinage de la fréquence 175 kHz pour le tube **b**/**a** = 0,9 et au voisinage de la fréquence 150 kHz pour le tube **b**/**a** = 0,86; dans le cas du tube **b**/**a** = 0,98, elle ne se situe pas dans le domaine de fréquence considéré. Autour de cette fréquence particulière, la résonance n'est pas détectable, ceci s'explique par le couplage quasi nul entre l'onde **S**₀ et l'eau.

Influence du matériau constituant la coque

Le même type d'étude que précédemment a été réalisé en choisissant différents matériaux constituant la coque. Les caractéristiques de ces matériaux sont données dans le tableau I. La viscosité des matériaux est supposée négligeable.

Le tube est toujours plongé dans l'eau et la cavité est remplie d'air. Le rayon externe a est le même pour tous les tubes considérés. La figure 5 montre quelques exemples.

ll est aisé de constater que, plus les vitesses de propagation des ondes de volume (C_L et C_T) dans ces matériaux sont grandes et plus l'écart de fréquence entre les résonances appartenant à l'onde S_0 est grand. De plus le domaine fréquentiel des résonances de l'onde A_0^- glisse vers les hautes fréquences.

Matériau	Vitesse longitudinale C _L (m/s)	Vitesse transversale C _T (m/s)	Masse volumique r (kg/m ³)
béryllium	12890	8 880	1 870
Acier inoxydable	5 790	3 100	7 900
cuivre	4 760	2 325	8 930
platine	3 260	1 730	21400

Tabl. 1: Caractéristiques des matériaux constituant la coque des tubes



Fig. 5: Spectres de résonance pour des tubes de différents matériaux

Reconnaissance d'un tube partiellement ou entièrement enfoui dans un sédiment

Contrairement à la lumière, les ultrasons peuvent pénétrer dans les sédiments si la fréquence n'est pas trop élevée. Il est donc possible de détecter la présence d'un corps d'un certain volume enfoui dans un sédiment, mais est-il possible de le reconnaître? Dans cette partie, une expérience conduite au laboratoire va montrer que cela est possible.

Dans le fond d'une cuve remplie d'eau, nous avons placé une couche épaisse de sable très fin saturée d'eau modélisant un sédiment (les dimensions des grains de sable sont de l'ordre du $1/10^{e}$ de mm). Un tube d'acier inoxydable de rayon $\mathbf{a} = 3 \text{ cm}$, de longueur $\mathbf{L} = 20 \text{ cm}$ et de rapport des rayons **b/a** = 0,98 (le même tube que dans la première partie) est positionné horizontalement, son axe parallèle à la surface du sable (Fig. 6a). La MIR impulsionnelle a été utilisée pour traiter les résultats. Le tube est excité verticalement et perpendiculairement à son axe par un transducteur large bande de fréquence centrale 1 MHz. Deux types de mesures ont été réalisés, le tube étant partiellement ou totalement enfoui.

Pour le tube semi-enfoui, le signal temporel de la figure 6b et le spectre de résonance de la figure 6c sont tracés.





La figure 6b conduit à faire quelques remarques :

- à environ 25 µs de l'écho spéculaire toujours lié à la réflexion sur l'arête du tube, un écho complexe est observable, il correspond à la réverbération de l'onde sur le sable;

- à environ 75 µs, un écho intense et large lié à la quasionde A₀- est détectable;

- sur tout le reste du signal temporel, une série d'échos dont l'amplitude décroît dans le temps et qui correspond à l'onde **S**₀ est visible.

L'onde Ao- est assez fortement atténuée par la présence du sable sur une demi-circonférence ce qui n'est pas étonnant car cette dernière est essentiellement une onde d'interface [7]. L'onde So, quant à elle, est beaucoup moins perturbée par le sable.

Pour obtenir le spectre de résonance de la figure 6c, les 50 premières microsecondes du signal sont remplacées par des zéros et une transformée de Fourier est appliquée au signal résultant. Le spectre de résonance ainsi obtenu caractérise assez bien le tube de b/a = 0,98.

Les résonances de l'onde ${\bf S_0}$ sont bien présentes, l'écho lié à l'onde A_0^- fait apparaître un léger fond non résonant sur ce spectre.

Pour le tube entièrement enfoui sous quelques millimètres de sable, le signal temporel de la figure 7a et le spectre de la figure 7b sont tracés.







Fig. 7: Reconnaissance d'un tube entièrement enfoui dans le sable

La figure 7a conduit à faire les remarques suivantes :

- dans les 20 premières microsecondes, les échos observés sont liés à la fois à la réverbération sur le sable et à la réflexion sur l'arête du tube;

- il n'existe aucun écho lié à l'onde Ao-, le sable amortit complètement la propagation de cette dernière;

- la présence d'une série d'échos liés à l'onde **S**o est encore observable, cette onde est peu sensible à la présence du sable, c'est une onde de coque.

Pour obtenir le spectre de résonance de la figure 7b, les 50 premières microsecondes du signal sont remplacées par des zéros et une transformée de Fourier est appliquée au signal résultant. Le spectre de résonance ainsi obtenu caractérise assez bien le tube de b/a = 0,98. Les résonances de l'onde So sont bien présentes. Il est encore possible de reconnaître le tube.

Remarques générales et conclusion

La Méthode d'Isolement et d'Identification des Résonances Impulsionnelle acoustique décrite permet de caractériser des tubes métalliques plongés dans l'eau ou enfouis dans du sédiment. Les tubes étudiés ici ont tous leur cavité remplie d'air mais il a été étudié au laboratoire des remplissages divers [8]. Les résultats sont différents mais il est toujours possible de caractériser la cible. Les spectres de résonances obtenus présentent des pics qui sont liés à la propagation d'ondes circonférentielles

dont les caractéristiques sont voisines, lorsque la coque est fine, de celles des ondes de Lamb se propageant sur des plagues planes. L'étude présentée a été réalisée en utilisant une excitation normale à l'axe du tube. Des études ont été menées pour des excitations suivant des incidences obligues, les résultats font apparaître un autre type d'ondes, les ondes guidées [9], mais le principe général reste le même. Les ondes guidées dans ce cas sont des ondes à propagation hélicoïdales. Il est toujours possible d'obtenir des spectres de résonance. La limitation en longueur des tubes utilisés n'a que peu d'importance quand l'excitation acoustique est normale à l'axe. En incidence oblique, les résonances peuvent être repérées par un mode circonférentiel correspondant au nombre de longueur d'onde dans la circonférence droite du tube et par un mode lié à l'onde stationnaire dans la longueur du tube [10-12].

Il est montré que les spectres de résonance caractérisent un tube, ils sont sensibles au rayon externe, au rapport des rayons et à la matière constituant le tube. Ces spectres peuvent servir à reconnaître un tube partiellement ou totalement enfoui dans un sédiment. Pour que le résultat soit concluant, il faut avoir une source ultrasonore ou sonore, suivant les dimensions du tube, directive afin d'obtenir un signal rétrodiffusé suffisamment intense pour être traité dans de bonnes conditions.

Remerciements

Les auteurs remercient Katia Cacheleux pour sa contribution scientifique aux résultats décrits dans cet article sur les tubes enfouis.

Références bibliographiques

 N. Gespa, « La diffusion acoustique par des cibles élastiques de forme géométrique simple : Théories et expériences », CEDOCAR, ISBN 2-7170-0884-5, Paris (1987).

[2] GV. Frisk, H. Überall, Creeping waves and lateral waves in acoustic scattering by large elastic cylinders », J. Acoust. Soc. Am., 59, pp. 46-54 (1976).

[3] IA Viktorov « Rayleigh and Lamb Waves », Plenum Press, New York (1967).

[4] P. Pareige, P. Rembert, J-L. Izbicki, G. Maze, J. Ripoche, « Méthode impulsionnelle numérisée pour l'isolement et l'identification des résonances », Phys. Lett., 135A, pp. 143-146, (1989).

[5] G. Maze, J. Ripoche, A. Derem, J-L. Rousselot, "Diffusion d'une onde ultrasonore par des tubes remplis d'air immergés dans l'eau », Acustica, 55, pp. 69-85, (1984).

[6] G. Maze, « Acoustic scattering from submerged cylinders. MllR Im/Re: Experimental and theoretical study », J. Acoust. Soc. Am., 89, pp. 2559-2566 (1976).

[7] G. Maze, D. Decultot, F. Léon, J. Ripoche, A. Klauson, J. Metsaveer, « Nature de l'onde d'interface de Scholte sur une coque cylindrique », Acustica, 81, pp. 201-213, (1995).

[8] F. Chati, F. Léon, G. Maze, « Acoustic scattering by a metallic tube with a concentric solid polymer cylinder coupled by a thin water layer. Influence of the thickness of the water layer on the two Scholte — Stoneley waves », J. Acoust. Soc. Am., 118, pp. 2820-2828 (2005).

[9] F. Léon, F. Lecroq, D. Decultot, G. Maze, « Scattering of an obliquely incident acoustic wave by an infinite hollow cylindrical shell », J. Acoust. Soc. Am., 91, pp. 1388-1397 (1992).

[10] N. Touraine, L. Haumesser, D. Decultot, G. Maze, « Analysis of the acoustic scattering at variable incidences from an extra thin cylindrical shell bounded by hemispherical endcaps », J. Acoust. Soc. Am., 108, pp. 2187-2196 (2000).

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

[12] L. Haumesser, D. Decultot, F. Léon, G. Maze, « Experimental identification of finite cylindrical shell vibration modes », J. Acoust. Soc. Am., 111, pp. 2034-2039 (2002).