

Expériences à échelle réduite de la propagation acoustique par petits fonds et par grands fonds marins

J-P Sessarego, R. Guillermin
CNRS/LMA
31, chemin Joseph Aiguier
13402 Marseille CEDEX 20

Dominique Fattaccioli
DGA Techniques navales
Avenue de la Tour Royale
BP 40915
83050 Toulon CEDEX

Résumé

Cet article propose de montrer que des expériences en cuve à échelle réduite permettent d'obtenir des données utilisables par les modélisateurs afin qu'ils testent leurs modèles sur des résultats parfaitement contrôlés. Grâce à l'utilisation d'un facteur d'échelle, on peut en effet, simuler en cuve différentes conditions de propagation en mer. Le coût peu élevé des expérimentations ainsi que la reproductibilité et le contrôle de tous les paramètres physiques du milieu sont également des avantages qui plaident en faveur de l'utilisation de modèles réduits. Les expériences décrites dans cet article ont été menées dans un guide d'onde constitué par une colonne d'eau de quelques centimètres reposant sur une épaisse couche de sable. Les paramètres physiques et acoustiques de ce sable ont été mesurés et sont donc parfaitement connus. On a utilisé différentes hauteurs d'eau et des signaux très large bande couvrant un large spectre de fréquences, l'objectif étant de simuler la propagation en mer dans toutes les conditions rencontrées par les sonars militaires qui vont des sonars très basses fréquences travaillant par petits fonds ou moyens fonds, à des sonars HF travaillant par grands fonds. Une autre série d'expérimentation a été conduite pour étudier le couplage entre propagation et diffusion acoustique par des cibles. La cible utilisée était une coque sphérique mince placée à différentes profondeurs dans la couche d'eau. Le champ acoustique a été mesuré autour de l'objet et en champ lointain. Les premiers résultats de mesures sont présentés et discutés. Enfin la dernière partie de l'expérimentation a consisté à étudier la propagation sur des fonds en pente afin de tester l'importance des phénomènes 3D.

La propagation du son dans l'océan a été étudiée de façon intensive au cours des 50 dernières années. Plusieurs modèles ont été développés pour décrire la propagation par petits fonds ou par grands fonds, incluant des modèles 2D et 3D. Ces modèles ont été développés en détail dans la littérature [1-4] et validés en mer pour la plupart d'entre eux, mais cette validation est souvent délicate à cause de la variabilité temporelle et spatiale du milieu marin et de la difficulté à maîtriser les paramètres de ce milieu. Très récemment ont été développés des algorithmes 3D dans des environnements complexes [5-10] (canyons, fonds en pentes...), ainsi que des modèles pour prendre en compte le couplage propagation-diffusion par un objet, mais de nouveau, leur validation se heurte au problème de la maîtrise des conditions expérimentales. L'utilisation de cuves acoustiques dans lesquelles on peut tester et valider les modèles en situation parfaitement contrôlée et reproductible, semble être une approche intéressante et très prometteuse. Ces essais en cuve sont peu coûteux par rapport à des essais en mer et tous les paramètres du milieu peuvent être mesurés pendant la durée de l'expérience. De plus le nombre de paramètres

variables peut être fixé à l'avance de manière à travailler dans des environnements simplifiés, ce qui n'est jamais le cas en situation réelle (on peut en effet s'affranchir des courants, des marées, des ondes internes, des fluctuations du milieu, on peut travailler avec des valeurs très élevées du rapport signal/bruit...). Enfin, tous les essais peuvent être répétés plusieurs fois si besoin est, en recréant exactement les mêmes conditions expérimentales, ce qui est tout à fait inimaginable pour des expériences en mer. Bien que d'une part l'environnement réel ne puisse pas être reproduit à l'identique et que d'autre part la mise à l'échelle nécessite d'énormes précautions, les essais en cuve permettent néanmoins d'isoler des phénomènes particuliers et de tester en environnement maîtrisé certaines hypothèses qui sont à la base des modèles et algorithmes couramment utilisés. Au LMA, une cuve de grande dimension (10m de long, 3m de large et jusqu'à 1m de profondeur) a été équipée pour permettre ce genre d'expérimentation à échelle réduite. Elle a été conçue dès le départ de manière à s'adapter avec souplesse à l'évolution des besoins en acoustique sous-marine.

Le fond de la cuve est constitué d'une épaisse couche de sable (taille moyenne des grains : 245 microns) de plusieurs centimètres d'épaisseur ce qui garantit, aux fréquences auxquelles on travaille, de disposer de conditions de milieu semi-infini. Cette cuve est équipée de deux chariots mobiles indépendants qui sont mis en mouvement par des moteurs à courant continu, pilotés par une baie d'alimentation, elle-même reliée à un ordinateur qui commande les mouvements. Le premier chariot porte l'émetteur qui peut se déplacer automatiquement suivant l'axe vertical seulement. Le deuxième chariot porte le récepteur qui peut se déplacer suivant les axes X, Y et Z. Ce système permet la mesure automatique du champ acoustique dans la cuve avec une précision de 1/10ème de mm. La cuve permet une excursion suivant l'axe X de plus de 6.5m.

Des considérations géométriques simples montrent que jusqu'à cette distance on peut encore séparer et éliminer les échos qui viennent des parois de la cuve. Après cette distance les échos interfèrent et il n'est plus possible d'éliminer les signaux parasites.

Le récepteur qui a servi à faire les mesures est un petit hydrophone Reson TC4035 qui a été conçu pour travailler dans la gamme de fréquence : 100-500 kHz.

Les propriétés acoustiques du sable (vitesse des ondes P et S, et atténuation) ainsi que les propriétés physiques et géophysiques (porosité, conductivité électrique, densité humide...) ont été mesurées à plusieurs reprises dans le passé [11]. Elles ont été de nouveau mesurées juste avant les expériences pour vérifier la stabilité de ces paramètres avec le temps. Le sable a été placé dans la cuve il y a plus d'une vingtaine d'années, et dégazé très précautionneusement de manière à être sûr qu'il n'y ait plus de bulles d'air à l'intérieur. On a veillé ensuite à ce qu'il ne soit plus jamais au contact avec l'air. L'eau de la cuve peut être recyclée, mais elle n'est jamais renouvelée, de manière à éviter la présence de bulles qui proviendraient de l'alimentation en eau par le réseau. Avant toute expérience le sable est lissé avec un râtelier horizontal, de manière à éviter la présence de rides en surface et de disposer d'un fond parfaitement plat. La seule rugosité de surface est liée à la taille des grains de sable et à la présence quelquefois d'agrégats. La température de l'eau est mesurée à l'aide d'une sonde électronique, en un point donné de la cuve. Si besoin était cette mesure pourrait s'effectuer en continu et être transmise en permanence au système d'acquisition.

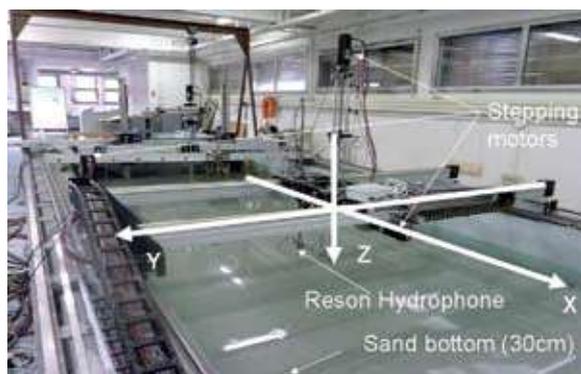


Photo 1 : Vue générale de la « cuve océanique »

Loi d'échelle entre les mesures à la mer et les mesures en cuve

Si on veut transposer en cuve des conditions de propagation observées en mer, la première contrainte est que la hauteur d'eau et la longueur d'onde acoustique vérifient une loi d'échelle imposant un rapport constant entre ces deux quantités.

Le facteur d'échelle est alors obtenu par la relation simple :

$$\frac{H}{H'} = \frac{\lambda}{\lambda'} \Rightarrow F.H = F'.H'$$

Où H, l et F (respectivement H', l' et F') sont la hauteur d'eau, la longueur d'onde et la fréquence en mer (respectivement en cuve).

Un des objectifs de cette étude était de couvrir le domaine le plus large possible d'applications en mer : des basses fréquences en très petits fonds jusqu'aux hautes fréquences par grands fonds. Ce domaine d'étude peut être illustré à l'aide de la Figure 1 dans laquelle on a fait apparaître le domaine d'intérêt (fréquence-hauteur d'eau), à la fois pour un environnement réel et pour les expérimentations en cuve. Dans ce diagramme, les zones rouges indiquent par exemple les configurations réelles couvertes par un facteur d'échelle de 1000 aux fréquences et hauteurs d'eau utilisées en cuve. L'intérêt de travailler avec un facteur d'échelle que l'on peut fixer arbitrairement est de pouvoir décrire de nombreuses configurations réelles à partir d'une seule expérience en cuve.

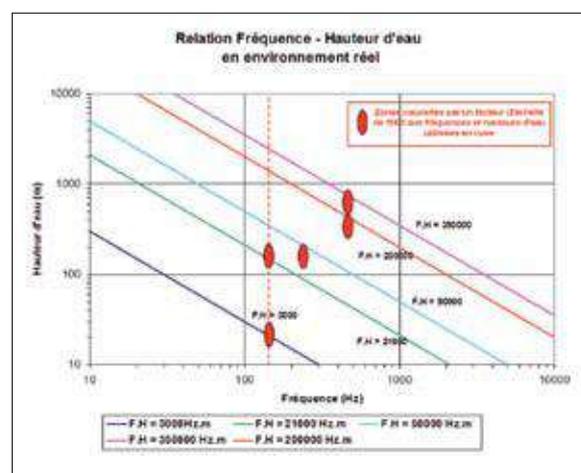


Fig. 1 : Diagramme montrant le domaine d'intérêt (fréquence-hauteur d'eau), à la fois pour un environnement réel et pour les expérimentations en cuve. Les zones rouges indiquent les configurations réelles couvertes par un facteur d'échelle de 1000 aux fréquences et hauteurs d'eau utilisées en cuve

Propagation par très petits fonds

Dans cette partie, compte tenu des relations d'échelles décrites au paragraphe précédent, on s'intéresse à la propagation par des fonds de l'ordre de la trentaine de mètres en mer et à des fréquences de l'ordre de la centaine de Hertz.

Compte tenu d'un facteur d'échelle de 1000, ceci va nous amener à travailler à des fréquences voisines de 140 kHz et des profondeurs d'eau comprises entre 3 et 5 cm.

Fond plat

Dans cette expérimentation on a utilisé une source omnidirectionnelle fabriquée au laboratoire et travaillant dans le domaine 100 kHz <math>f < 350 \text{ kHz}</math>. Le signal émis était un pulse très court avec une enveloppe gaussienne pour lisser les effets de fenêtrage temporel. Ce signal, fabriqué à l'aide d'un programme MATLAB est envoyé à un convertisseur Numérique/Analogique (N/A) pour être émis par la source, après avoir été amplifié par un amplificateur de puissance, jusqu'à un niveau de 140 Vpp. Un exemple de signal électrique émis ainsi que son spectre sont donnés sur la figure 2.

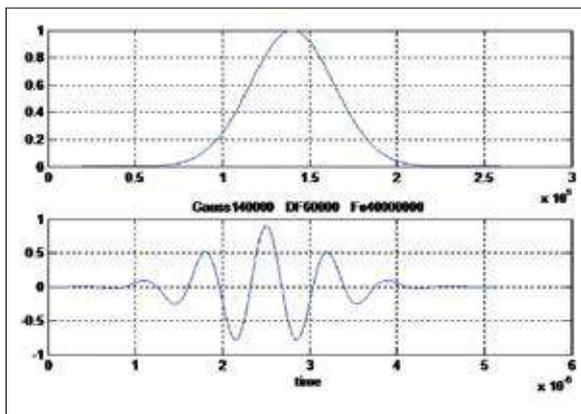


Fig. 2 : Signal électrique appliqué à la source (figure du bas) et son spectre (figure du haut)

Dans cet essai, la fréquence centrale du signal émis était de 140 kHz et la profondeur d'eau de 26.1mm, ce qui autorisait la propagation de 3 modes. En prenant un facteur d'échelle de 1000, cette expérience peut alors simuler une source en mer fonctionnant à 140 Hz sur des fonds de 26 m.

Un hydrophone large bande et ponctuel, monté sur un chariot mobile a permis de mesurer le champ suivant un plan vertical dans l'axe de la cuve. Les pas de déplacements suivant X et Z étaient respectivement de 50 mm et de 2 mm. Pour chaque position du récepteur on a effectué 256 moyennes avant d'enregistrer le signal sur le calculateur. Ceci a permis d'augmenter sensiblement le rapport signal/bruit. Signalons que la mesure complète des signaux dans le plan vertical X, Z peut prendre jusqu'à une dizaine d'heures et quelquefois plus, en fonction de l'échantillonnage considéré.

Pour obtenir un fond plat et horizontal, le sable a été lissé à l'aide d'un râteau monté sur un chariot motorisé que l'on déplaçait très lentement suivant l'axe longitudinal de la cuve. Ce ratissage a permis d'éviter la présence de ridules de sable sur le fond, comme l'illustre la Figure 3 qui présente une cartographie 2D du fond ainsi obtenu. Les variations de hauteur ont été mesurées ; elles sont inférieures au mm.

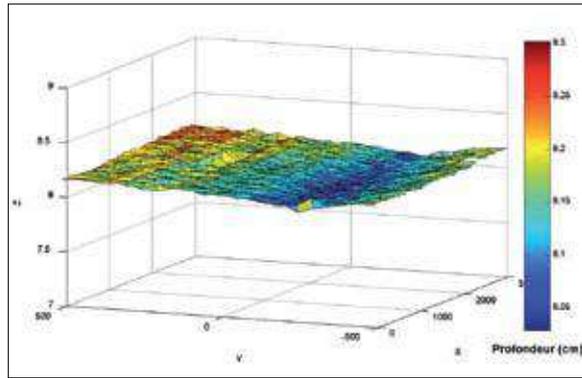


Fig. 3 : Cartographie 2D du fond de sable de la cuve (sur 3m²)

La figure 4 donne un exemple de diagramme temps / profondeur du récepteur. Ce diagramme représente, pour une distance horizontale source-récepteur fixe, l'enveloppe des signaux reçus à différentes profondeurs. On peut clairement observer sur cette figure, les trois modes de propagation.

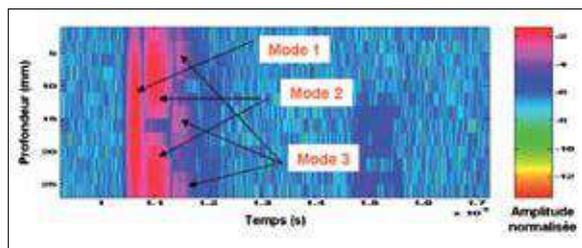


Fig. 4 : Diagramme temps/profondeur du récepteur, mettant en évidence les 3 modes de propagation

La figure 5 (page suivante) montre un exemple de pertes en transmission (Transmission Loss : TL) pour des conditions expérimentales où l'émetteur était immergé à 20 mm et le récepteur à 22 mm. Les résultats expérimentaux ont été comparés à des résultats numériques obtenus à partir du code OASES. Les comparaisons ont été faites successivement pour les fréquences 140 kHz (Figure 5a) et 180 kHz (Figure 5b). L'accord obtenu est relativement bon. Il faut noter cependant que dans l'expérience en cuve, le pas de déplacement en distance (50mm) était très grand comparé au pas de calcul, ce qui explique que la courbe expérimentale ne puisse pas suivre parfaitement la courbe calculée, en particulier dans les zones où les niveaux sont très faibles. La figure 5b, obtenue pour une fréquence plus élevée, montre des résultats tout à fait analogues.

Fond en pente

Dans cette configuration, le fond de la cuve a été lissé à l'aide d'un râteau fabriqué spécialement, de manière à créer un profil en pente. L'angle de la pente a été choisi à 4.5°, ce qui correspond à l'ordre de grandeur des pentes observées sur les talus océaniques. La Figure 6 présente la cartographie 2D de ce fond, suivant une excursion de 2 m en X et de 1.20 m en Y. Le schéma général de l'expérimentation est donné sur la Figure 7. L'émetteur et le récepteur sont tous deux situés au dessus de la pente.

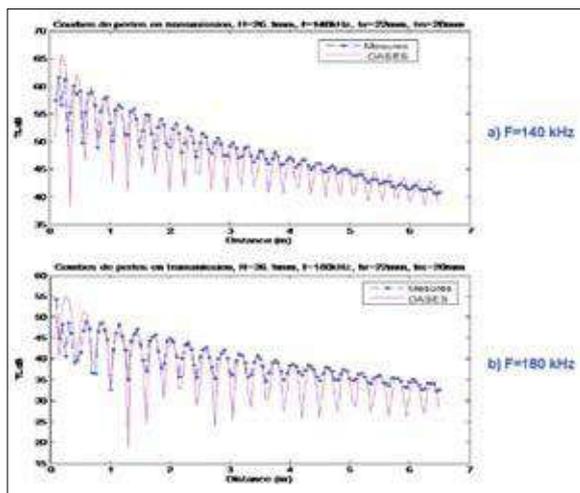


Fig. 5 : Pertes en transmission : comparaison expérience-modèle

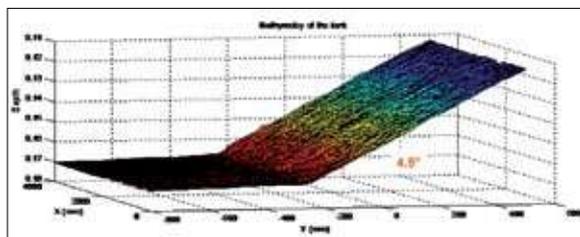


Fig. 6 : Cartographie 2D dans le cas du fond en pente

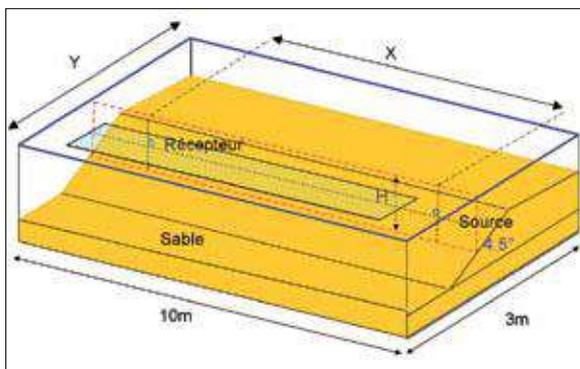


Fig. 7 : Schéma général de l'expérimentation sur le fond en pente

Les mesures acoustiques ont été effectués dans les deux directions du plan horizontal, dans le sens de la pente (axe Y) et orthogonal à la pente (axe X).

Lorsque la distance émetteur-récepteur croît, on peut observer une déviation de la propagation acoustique dans le plan horizontal ; dans ces conditions, la propagation s'effectue principalement vers le bas de la pente.

L'analyse détaillée de la Figure 8 montre qu'à partir d'une distance de 3 m, l'énergie acoustique sort complètement du plan vertical contenant l'émetteur et le récepteur. Ce phénomène est une manifestation des effets 3D qui peuvent prendre naissance sur le talus continental, même en présence de pentes faibles.

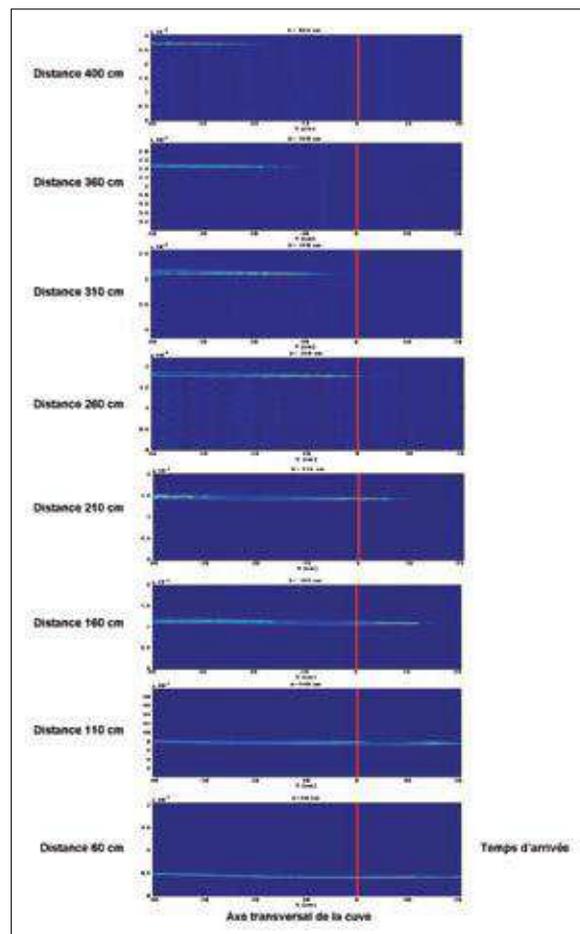


Fig. 8 : Enveloppe du signal temporel reçu à différentes distances de l'émetteur, dans le plan horizontal. L'émetteur et le récepteur sont tous deux situés au dessus de la pente. Le trait rouge indique l'axe longitudinal de la cuve, à partir de l'émetteur

Vitesse des ondes P	5554.5 m/s
Vitesse des ondes S	3020.8 m/s
Densité	9217 kg/m ³
Rayon interne	1.44 cm
Rayon externe	1.50 cm

Tableau 1 : propriétés physiques de la cible (coque sphérique remplie d'air)

Couplage propagation-diffusion

Dans cette configuration, pour ne pas être perturbé par des effets 3D liés à des fonds en pente, et pour se focaliser uniquement sur l'étude de phénomènes de diffusion par des cibles et d'interactions propagation-diffusion, on est revenu à la propagation sur fond plat.

Profondeur 121 mm, fréquence 140 kHz

Dans les essais qui vont être présentés dans ce paragraphe, la fréquence est toujours fixée à 140 kHz, mais la profondeur d'eau a été augmentée (H=121 mm) et une coque élastique mince (3cm de diamètre), remplie d'air a été introduite dans la couche d'eau. Les caractéristiques physiques de cette cible sont données dans le Tableau 1.

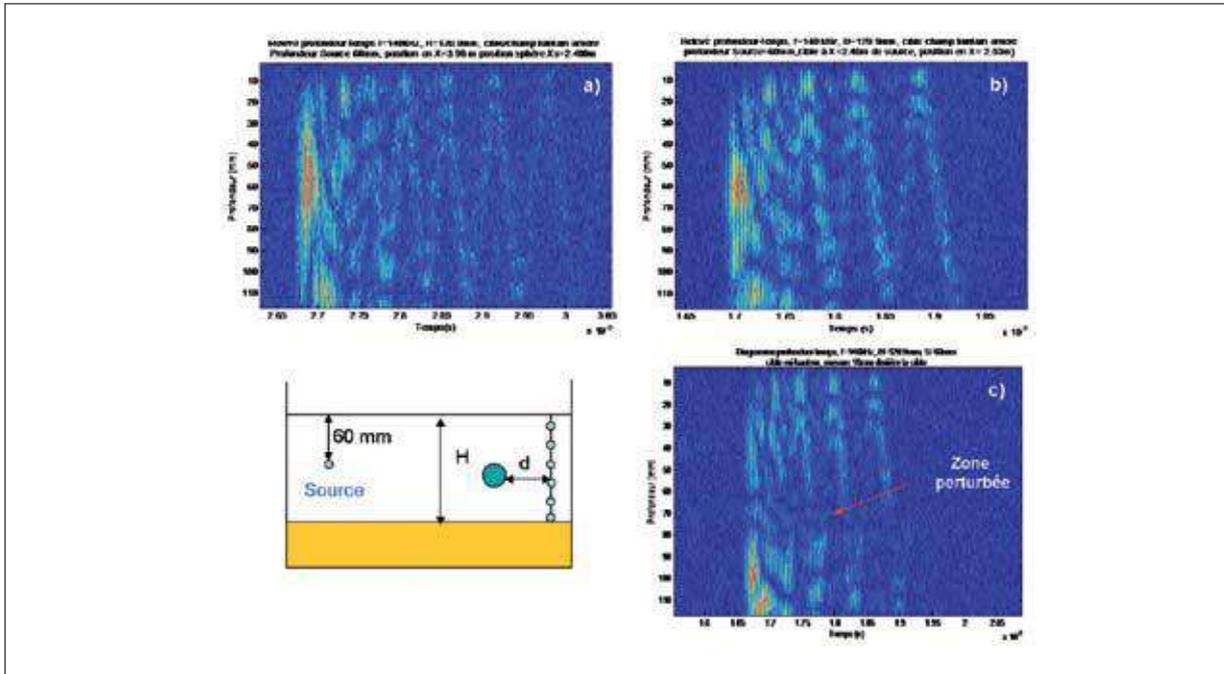


Fig. 9 : Diagramme Temps-Profondeur récepteur, pour différentes distances d cible-récepteur. a) d = 48 cm, b) d = 5 cm, c) d = 1 cm

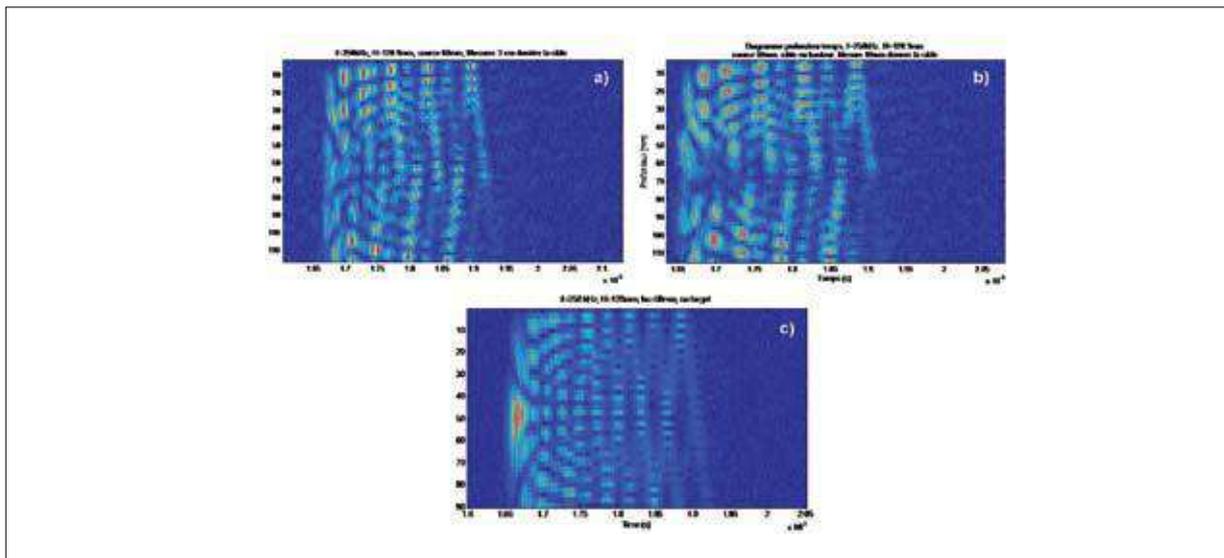


Fig. 10 : Diagramme Temps-Profondeur récepteur pour différentes distances d cible-récepteur
a) d = 3 cm, b) d = 1cm, c) pas de cible

La diffusion en espace libre de cette coque mince, qui a fait l'objet de nombreuses études [12-13], est maintenant bien maîtrisée. L'enjeu de cette nouvelle expérimentation était d'étudier le couplage entre la propagation et la diffusion par cette coque lorsqu'elle est confinée dans un guide d'onde. Pour ce faire, cette cible a été placée soit sur le fond, soit à mi-hauteur dans la couche d'eau, soit encore près de la surface libre. Pour la position où la cible était placée à mi-hauteur, on a enregistré les signaux reçus sur des capteurs placés derrière la cible (en configuration de transmission) et à différentes distances de celle-ci (1cm, 5cm et 48 cm). Les résultats de mesure sont donnés sur la figure 9. Il est difficile sur les enregistrements, de détecter la présence d'une cible, sauf si on est suffisamment proche de celle-ci.

Profondeur 121 mm, fréquence 250 kHz

Dans cette expérience on a changé la fréquence tout en maintenant la hauteur d'eau à la valeur précédente. Comme précédemment la cible a été placée à mi-hauteur dans le guide d'onde. L'objectif était ici de mettre en évidence les phénomènes d'interaction entre propagation et diffusion, en particulier les effets de masquage et de diffraction par la cible. Les résultats de mesures sont présentés sur la figure 10. On peut voir sur cette figure que des effets complexes sont nettement visibles lorsque les mesures sont faites très près de la cible, mais des anomalies subsistent même lorsqu'on s'éloigne de la cible. On est alors dans des zones de forte interaction : propagation/diffusion.

Profondeur 436 mm, fréquence 500 kHz

Dans cette expérience on a augmenté à la fois la profondeur d'eau et la fréquence de manière à simuler par exemple l'effet d'un sonar haute fréquence travaillant par grands fonds. Comme précédemment nous avons positionné la cible à mi-hauteur. On a mesuré le signal transmis sur une ligne verticale à 4 cm derrière la cible. Cette fréquence de 500 kHz correspond à une région de fortes résonances de la cible, et des ondes de surface assimilables à des ondes de Lamb symétriques et antisymétriques, peuvent effectuer plusieurs fois le tour de l'objet. Ces ondes se propagent à des vitesses de groupe de l'ordre de 1900 m/s sur la coque tout en rayonnant constamment de l'énergie dans le milieu extérieur [13]. Avec une antenne réceptrice placée en mode « transmission » on s'attend donc à recevoir des signaux provenant de la cible, avant l'arrivée de l'onde directe qui s'est propagée dans l'eau à vitesse plus lente. C'est ce que montre clairement la Figure 11 où l'on peut observer l'arrivée d'un signal « précurseur » indiquant la présence d'une cible sur le trajet acoustique.

En plus de cette arrivée directe on peut observer sur la figure 11 un effet d'ombre qui se manifeste clairement sur les fronts d'ondes correspondant aux réflexions par la surface libre du milieu et par le fond.

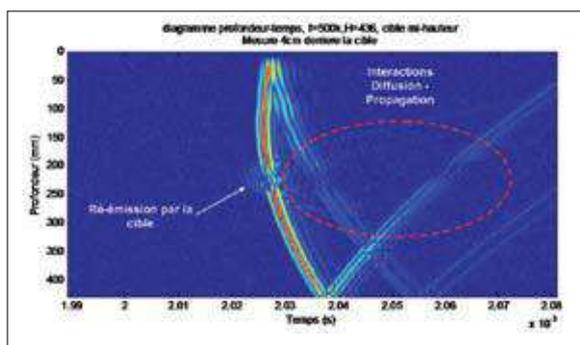


Fig. 11 : Diagramme Temps-Profondeur récepteur, mesuré à une distance de 4 cm derrière la cible

Conclusions et perspectives

Dans cette étude on a simulé différentes conditions de propagation d'un signal acoustique dans le milieu marin et différentes conditions de détection d'une cible dans ce canal de transmission. On a balayé à la fois la fréquence d'émission, mais aussi la profondeur d'eau pour couvrir des conditions intéressantes la détection sonar.

Ces essais en cuve ont montré une grande souplesse et une approche nouvelle pour tester des modèles numériques. Les conditions de reproductibilité des expériences et la possibilité de contrôler tous les paramètres en font un instrument privilégié pour l'étude de phénomènes complexes apparaissant en mer.

Après avoir montré la faisabilité d'une telle approche sur maquette pour appréhender des phénomènes complexes, l'intérêt va se porter maintenant vers des situations de plus en plus proches de la réalité ; les études qui pourront être menées au cours des prochaines années vont concerner la propagation acoustique dans des milieux fluctuants et

les traitements d'antennes en présence de décohérence du milieu, la scintillation acoustique très basse fréquence et la propagation de bruits proches du bruit de mer, la détection d'objets très proches des interfaces....

Ce travail a été soutenu par un contrat passé avec la DGA/Techniques Navales.

Références bibliographiques

- [1] C.C. Leroy, "Sound propagation in the Mediterranean sea," in *Underwater Acoustics*, Vol 2, 203-241, V.M. Albers(Ed) Plenum Press, New-York (1967)
- [2] C.S. Clay and H. Medwin, "Acoustical Oceanography," Wiley, New-York (1977)
- [3] C. Gazanhes, and J.L. Garnier, "Experiments on single mode excitation in shallow water propagation," *J. Acoust. Soc. Am.* 69 963-969, (1981).
- [4] P. Papadakis, M. Taroudakis, F. Sturm, P. Sanchez and J.P. Sessarego, "Scaled Laboratory Experiments of Shallow Water Propagation: Calibration phase," *Acta Acustica/Acustica* Vol 94, n°5, 676-684, (2008).
- [6] M. Tran Van Nhieu, "Scattering from slender bodies in a homogeneous waveguide," *J. Acoust. Soc. Am.* 88(6), 2880-2888, (1990).
- [7] F. Ingenito, "Scattering from an object in a stratified medium," *J. Acoust. Soc. Am.* 82, 2051-2059, (1987).
- [8] A. Tolstoy, "3-D propagation issues and models," *J. Comput. Acoust.* 4(3), 43-271 (1996).
- [9] F. Sturm, "Numerical simulations with 3DWAPE considering shallow water range-dependent environments," *J. Acoust. Soc. Am.* 109(5), 2334-2335 (2001).
- [10] A. Korakas, F. Sturm, J.-P. Sessarego, D. Ferrand, "Scaled model experiment of long-range across-slope pulse propagation in a penetrable wedge," *J. Acoust. Soc. Am.*, 126(1), EL22-EL27, (2009).
- [11] J.-P. Sessarego, A.N. Ivakin, and D. Ferrand, "Frequency dependence of phase speed, group speed and attenuation in water-saturated sand: Laboratory experiments," *IEEE J. Ocean. Eng.* 33(4), 359-366, (2008).
- [12] J.L. Rousselot, A. Gérard, J.-P. Sessarego, J. Sageloi, « Réponse basse fréquence d'une coque sphérique immergée, » *Acustica*, Vol 66, 1988.
- [13] J.-P. Sessarego, P. Cristini, N.S. Grigoryeva, and G.M. Fridman, "Backscattering by a spherical shell close to the air-water interface: comparison tank experiment/modelling," *European Conference in Underwater Acoustics (ECUA2010)*, Istanbul 5th-9th July 2010.