

SIMULATION EXPERIMENTALE SUR MODELES REDUITS  
EN ENVIRONNEMENT MARIN

G. RABAU, J-P. HERAULT, C. GAZANHES

C.N.R.S.- Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique  
31,chemin Joseph-Aiguier. 13402 Marseille Cedex 09

RÉSUMÉ

ABSTRACT

Dans le but d'effectuer une simulation expérimentale sur modèles réduits représentant différents types de fonds marins, nous avons réalisé des maquettes synthétiques à l'aide de matériaux composites dont les caractéristiques acoustiques peuvent être modifiées afin d'approcher au mieux celles du fond marin. Un ensemble multicouche, constituant le modèle réduit expérimental, est ensuite réalisé et comparé au modèle théorique. Cette comparaison, effectuée par le biais de coefficients de réflexion, nous informe sur la validité de simulation des maquettes réalisées et sur leur aptitude à reproduire les propriétés du milieu naturel.

With intent to simulate experimentally various types of sea beds in using scale models, we have implemented composite materials. Each composite is formed from one or several fillers and a binding agent. The multilayered experimental scale models are realized and compared to the theoretical models in calculating the reflection coefficients by a matrix formalism. So we can value the simulation quality produced by these scale models.

1. INTRODUCTION

L'objectif de la simulation étant une étude sur la propagation acoustique sous-marine avec prise en compte du *fond marin*, nous nous intéressons au comportement de *milieux multicouches* insonifiés par une onde plane en incidence oblique. Dans cette intention, nous avons réalisé des stratifiés à l'aide de *matériaux de synthèse* simulant au mieux les couches réelles. Il est alors possible d'effectuer une simulation expérimentale sur modèles réduits (maquettes en similitude) avec l'avantage non négligeable sur l'expérimentation in situ d'un moindre coût et également d'une analyse des phénomènes physiques en isolant certains paramètres aisément modifiables.

2. METHODE DE MODELISATION

Préalablement à toute action expérimentale, nous entreprenons -- en résolvant l'équation de propagation dans un milieu multicouche, à laquelle sont adjointes les conditions aux limites dues au milieu considéré -- la modélisation théorique et numérique d'un exemple constitué par l'empilement eau/sédiment/substrat en utilisant le *formalisme matriciel* de Thomson (matrices de couches) : cette méthode, basée sur des formules de récurrence liant une couche à la couche voisine, permet d'écrire un système matriciel, fonction du nombre *n* de couches considérées, de la forme :

$$(u_x^n, u_z^n, T_x^n, T_z^n) = A_n (u_x^1, u_z^1, T_x^1, T_z^1)$$

où les *u* et les *T* sont respectivement les déplacements et les

contraintes alors que *A<sub>n</sub>* représente le produit matriciel des *n* matrices de couches (ou matrices de transfert).

En effectuant ce produit matriciel et en appliquant les conditions de modes propres, nous caractérisons le milieu par son coefficient de réflexion rendant compte du comportement global du profil étudié, quel que soit le nombre de couches impliquées et leur nature.

3. REALISATION DE MODELES ET SIMULATION

La réalisation d'un modèle géoacoustique passe par l'élaboration d'une maquette reproduisant le fond marin à partir de la connaissance de valeurs mesurées ou calculées et des paramètres intervenant en acoustique sous-marine. Un tel modèle doit reproduire l'épaisseur de chaque couche considérée, qu'elle soit fluide ou solide, ainsi que les propriétés des sédiments ou du socle simulé (nécessité d'une étude approfondie de la géologie du milieu marin réel).

L'élaboration du modèle peut s'établir en partant des valeurs *moyennes* indiquées dans le tableau ci-dessous :

| Matériau | Vitesse longit. (m/s) | Vitesse transv. (m/s) | Masse volum. (kg/m <sup>3</sup> ) | Atténuation α (dB/m.kHz) |         |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------|
|          |                       |                       |                                   | longit.                  | transv. |
| Sédiment | 1500 à 1750           | -                     | 1300 à 2000                       | 0,1 à 0,25               | -       |
| Substrat | 5700                  | 2700                  | 2600                              | 0,03                     | 0,2     |



Il convient de remarquer que, selon la position géographique du relevé et le site océanique considéré, les valeurs mentionnées précédemment peuvent changer dans de grandes proportions et, par conséquent, ne sauraient constituer qu'une base de départ.

Cependant l'estimation des caractéristiques acoustiques des *matériaux composites* entrant dans la fabrication du modèle, doit être effectuée en considérant les grandeurs physiques telles que module d'Young  $E$ , module de compressibilité  $K$ , module de cisaillement  $G$  et coefficient de Poisson  $\nu$ , afin de déterminer les paramètres acoustiques (vitesses longitudinale  $c_L$  et transversale  $c_T$ , masse volumique  $\rho$ , et atténuation  $\alpha$ ) affectés à chaque couche constitutive du milieu. L'évolution des caractéristiques acoustiques et mécaniques des résines en fonction de leurs charges est décrite par différentes théories: celles de Corsaro (calcul de la masse volumique), de Kerner (calcul du module d'Young), de Hill (calcul du coefficient de Poisson) et de Yamakawa-Beltzer (calcul de l'atténuation). ( Cf. graphiques ci-dessous )

Par ailleurs, le passage au modèle réduit doit prendre en compte un *facteur d'échelle* entre les grandeurs réelles et celles du modèle, faisant intervenir des considérations physiques telles que : gamme de fréquences utilisées, portée de détection et profondeur du milieu marin; dans ce cas, l'invariant choisi est la constance du rapport *dimensions géométriques/longueur d'onde*.

Le comportement du modèle géoacoustique est donc étudié en partant de la modélisation faisant intervenir les caractéristiques acoustiques de chaque couche et de leur épaisseur (problème direct) et également de la réalisation d'une maquette en similitude de nature synthétique reproduisant le mieux possible la configuration des couches réelles du fond marin.

La réalisation de ces modèles synthétiques est effectuée en utilisant des matériaux composites pour des raisons techniques de facilité d'emploi, de choix étendu et de qualités acoustiques favorables. Chaque composite est obtenu en associant un liant et une ou plusieurs charges; en faisant varier l'apport de charges dans le liant selon la qualité et la quantité choisies, il est possible de modifier les caractéristiques acoustiques (vitesse de propagation, masse volumique et atténuation) du composite créé. Ainsi le *matériau solide élastique* est élaboré en chargeant une résine polyester de poudres métalliques (aluminium, tungstène, alumine) alors que les *couches fluides* sont réalisées avec des élastomères (type R.T.V.) ou des résines polyuréthanes (DF 1013) composées d'une résine et d'un durcisseur jouant le rôle de charge. Les couches obtenues sont soumises ultérieurement à des tests permettant de déterminer leurs caractéristiques acoustiques et de choisir les produits les plus aptes à simuler un fond particulier.

Le modèle théorique, analogue au modèle réduit expérimental, est déterminé par l'algorithme de calcul prenant en compte le formalisme matriciel et fournit le coefficient de réflexion théorique. Ce dernier a l'avantage de donner des informations d'ordre prévisionnel sur le comportement de configurations réelles simples et même sur celui de modèles complexes.

Une étude comparative entre les coefficients de réflexion théorique et expérimental nous informe sur la validité de simulation

des maquettes réalisées et, par voie de conséquence, sur leurs aptitudes à reproduire les propriétés du milieu naturel.

#### 4. CONCLUSION

Dans des publications antérieures (Cf. Bibliographie), nous avons étudié différentes configurations de milieux stratifiés : celle relative au multicouche sur substrat semi-infini (permettant de simuler un fond marin discrétisé en couches parallèles et homogènes) a été mise en oeuvre dans cette étude.

Par ailleurs, d'un point de vue numérique il convient de remarquer que la résolution, par le formalisme matriciel, des équations de propagation dans un milieu stratifié, offre l'avantage majeur d'étendre les investigations à un nombre quelconque de couches.

Au plan des réalisations, des essais successifs et variés ont conduit à utiliser les résines comme matériaux de synthèse aptes à simuler les fonds marins réels, qu'ils soient sédimentaires ou rocheux. En effet les qualités de ces produits sont multiples; mais ces matériaux doivent faire l'objet d'une étude préalable concernant la quantité et la nature des charges à incorporer au liant pour obtenir le composite approprié. Il faut toutefois reconnaître que le modèle simulé ne peut prendre en compte *simultanément tous* les paramètres acoustiques.

En dernière analyse, la simulation sur modèles réduits de problèmes de propagation en acoustique sous-marine présente de nombreux avantages. Outre son intérêt économique -- puisqu'elle ne demande pas les moyens lourds nécessaires en mer -- elle constitue un moyen expérimental pour valider les modèles numériques et, à travers eux, les moyens théoriques.

#### 5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] BREKHOVSKIKH L.M. Waves in layered media. Academic Press, New York, 1980
- [2] EVANS R.B. The decoupling of seismic waves. Wave motion 8. 321-328. North-Holland (1986)
- [3] EWING W.M., JARDETZKY W.S., PRESS F. Elastic waves in layered media. McGraw-Hill. 1957
- [4] FOLDS D.L. and LOGGINS C.D. Transmission and reflection of ultrasonic waves in layered media. J.A.S.A., vol. 62, N° 5 nov. 1977
- [5] GILBERT F. and BACKUS G.E. Propagator matrices in elastic waves and vibration problems. Geophysics vol.31, 326-332 (1966)
- [6] HAMILTON E.L. Geoacoustic models of the sea floor. "Physics of sound in marine sediments", edited by L. Hampton ( Plenum , New York, 1974 )
- [7] HASKELL N.A. The dispersion of surface waves on multilayered media. Bulletin of the Seism. Soc. of America. 1953, 43, N° 1
- [8] HERAULT J.P. Etude des milieux stratifiés: modélisation géoacoustique . Note Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique N° 113. Juil.1989

[9] HERAULT J.P., RABAU G., GAZANHES C. Propagation dispersive en milieu stratifié : simulation sur modèles réduits. Revue de Physique Appliquée . Journal de Phys. III 1 (Mars 1991) 389-414

[10] JONES J.P. Wave propagation in a two-layered media . Journal of Applied Mechanics . June 1964

[11] KENNETT B.L.N. Seismic wave propagation in stratified media . Cambridge University Press, Cambridge (1983)

[12] LONGUEMARD J.P. Détermination in situ de paramètres acoustiques, mécaniques et sédimentologiques des fonds marins. Corrélation entre ces divers paramètres. Thèse Docteur d'Etat ès Sciences Physiques. Perpignan 1977

[13] PATOT J.-J. Evaluation de la célérité des ondes longitudinales dans les sédiments marins soumis à différentes pressions effectives et interstitielles. Thèse de Doctorat nouveau régime. Perpignan 1990

[14] RABAU G. Modèles géoacoustiques. Thèse de Doctorat de l'Université d'Aix-Marseille II. Juin 1990

[15] REISSNER H. Der senkrechte und schräge Durchtritt einer in einem flüssigen Medium erzeugten ebenen Dilatations - (Longitudinal)- Welle durch eine in diesem Medium befindliche planparallele feste Platte. Helv. Phys. Acta. 1938, vol.11

[16] RICHARDS P.G. Elastic wave solutions in stratified media. Geophysics 36, 798 (1971)

[17] THOMSON W.T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium . Jour. Appl. Phys. 1950, vol.21

[18] TOLSTOY & CLAY Ocean acoustics : theorie and experiment in underwater sound. McGraw-Hill

[19] VIKTOROV I.A. Rayleigh and Lamb waves. Plenum Press. 1967

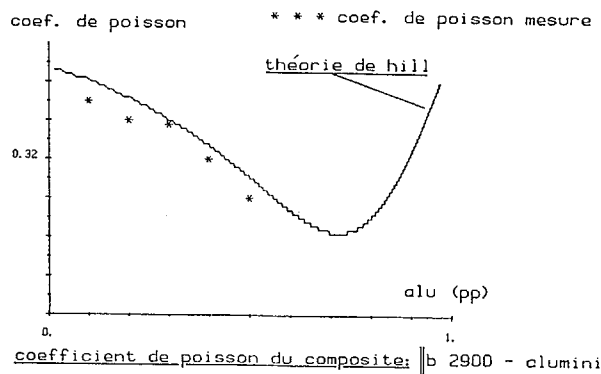
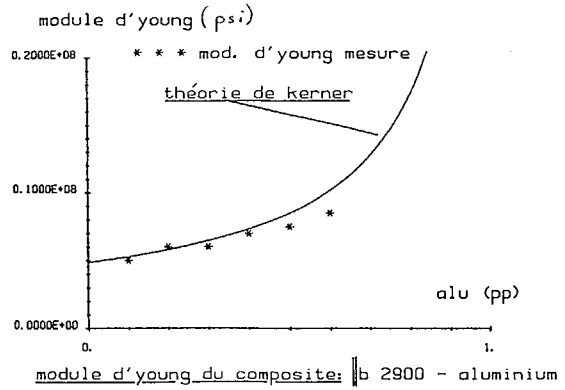


Fig. 2 et 3 - Ces deux courbes nous permettent d'affirmer que pour calculer le coefficient de Poisson nous devons utiliser la théorie de Kerner et pour le module d'Young la théorie de Hill. A partir de ces grandeurs il est facile de retrouver, grâce aux formules classiques des matériaux élastiques, les vitesses de propagation longitudinale et transversale.

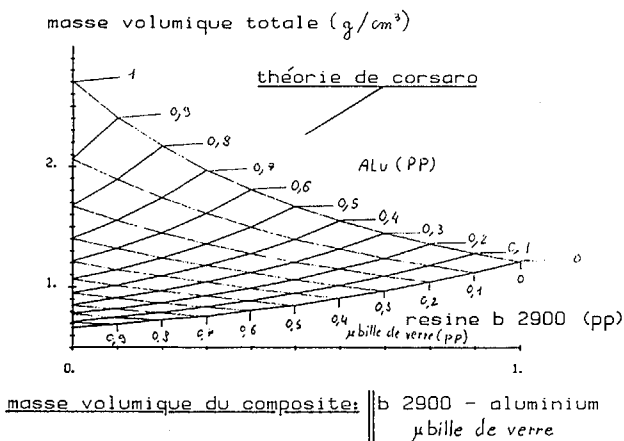


Fig. 1 - Abaque permettant de déterminer la masse volumique du composite. B 2900-Aluminium-Micro billes de verre d'après la formule suivante:  $\alpha_{total} = \sum(\rho_i V_i / V_{total}) = 1 / \sum(M_i / \rho_i)$  où  $\rho_i$  est la masse volumique de la charge  $M_i$  la fraction pondérale de la charge  $i$  et  $V_i$  la fraction volumique de la charge  $i$ .

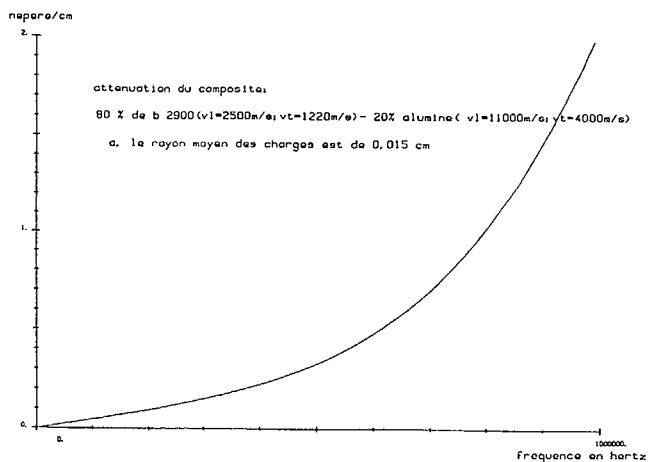
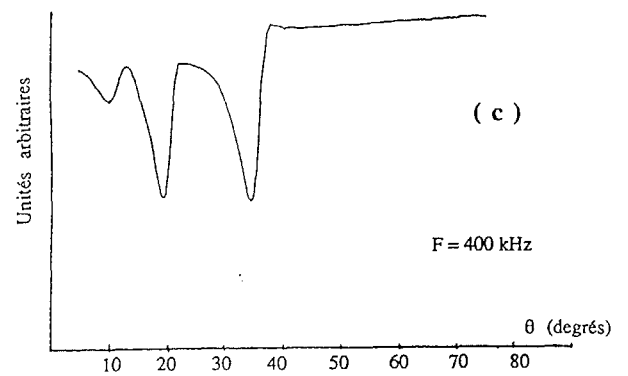
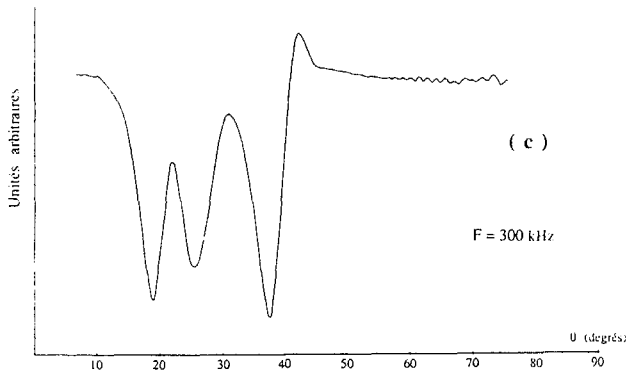
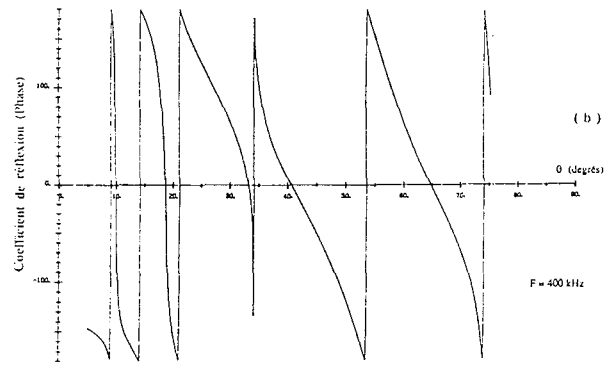
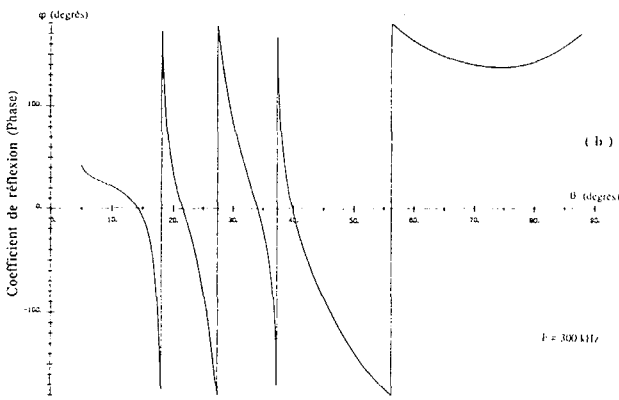
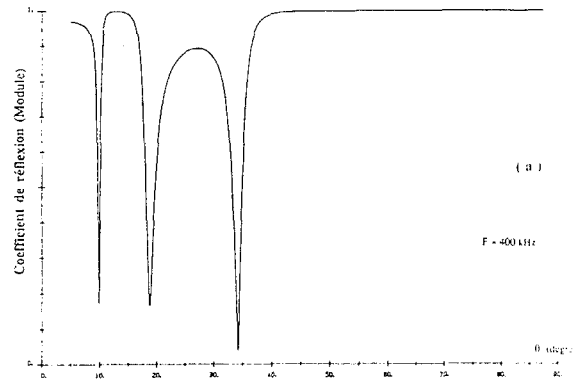
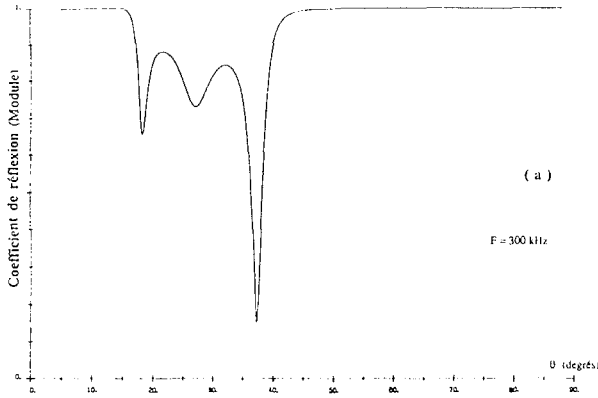


Fig. 4 - Courbe de l'atténuation tracée d'après la théorie de Yamakawa pour le composite B 2900-Alumine obtenue d'après les équations suivantes:  
 $\alpha = 2 \times \pi \times a^6 \times h^4 \times N_0 \times (2 Be_0^2 + 2/3(1 + 2N^3)Be_1^2 + 1/5(2 + 3N^5)Be_2^2)$   
 avec  $N = k_{transversal} / k_{longitudinal}$   
 $h$  = nombre d'onde longitudinal  
 $N_0$  = nombre d'osostades par unité de volume  
 $a$  = diamètre d'une charge  
 $Be_0 = 1/3(3(\lambda - \lambda') + 2(\mu - \mu'))(4\mu + 3\lambda' + 2\mu')$   
 $Be_1 = 1/3(1 - \rho'/\rho)$   
 $Be_2 = 20/3(\mu' - \mu)/(16\mu\mu' + 6\lambda\mu' + 14\mu^2 + 9\lambda\mu)$   
 $\lambda, \mu$  coefficients de Lamé du liant  
 $\lambda', \mu'$  coefficients de Lamé des charges  
 $\rho$  masse volumique du liant  
 $\rho'$  masse volumique des charges



Figures 5 . Coefficient de réflexion calculé (a) = module, (b) = phase et mesuré (c) = module en fonction de l'incidence  $\theta$  pour le milieu stratifié : B 2900 (4,6 mm) sur ALUMINIUM (5 mm) à F = 300 kHz

Figures 6 . Coefficient de réflexion calculé (a) = module, (b) = phase et mesuré (c) = module en fonction de l'incidence  $\theta$  pour le milieu stratifié : DF 1013 (5 mm) sur ALUMINIUM (5 mm) à F = 400 kHz