

## SIMULATION D'ENVIRONNEMENT EN ACOUSTIQUE SOUS-MARINE

RABAU G.; PIRAUX J.; LEANDRE J.; HOLTZER R.

L.M.A. Equipe US CNRS MARSEILLE  
31, Chemin J. AIGUIER - 13402 MARSEILLE CEDEX 20

### 1. INTRODUCTION

Réaliser un modèle géoacoustique complet de la mer et du fond c'est simuler à l'aide de matériaux convenables les différents constituants des fonds marins et reproduire le profil bathycélérimétrique propre à la couche d'eau reposant sur ce socle.

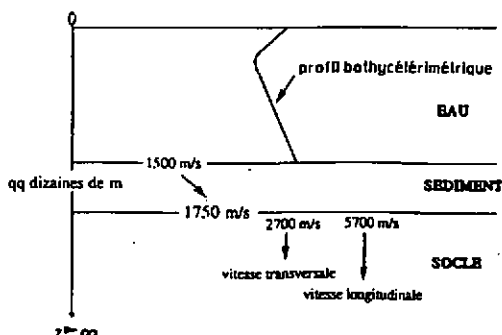
Par un apport de charges dans une résine, en qualité et quantité choisies, il est possible de faire varier les caractéristiques acoustiques (atténuation, vitesses de propagation, masse volumique) du composite ainsi créé. L'étude de cette propriété nous permet d'envisager la fabrication de modèles réduits adaptés à la simulation des fonds marins. Tous les modèles ainsi fabriqués ont été testés indépendamment les uns des autres, afin de déterminer leurs caractéristiques acoustiques. La théorie de Brekhovskikh généralisée à N couches d'épaisseur finie permet de calculer, pour ces plaques, le coefficient de réflexion. Une étude comparative entre les valeurs calculées et expérimentales nous renseigne sur les qualités de simulation des maquettes réalisées. Enfin, des mesures et des calculs effectués dans le cadre de la propagation par petits fonds confirment les résultats acquis, à savoir : les résines polyuréthane conviennent très bien pour simuler les différentes couches fluides alors que les résines polyester chargées reproduisent mal un fond élastique semi-infini [1].

Pour reproduire le profil bathycélérimétrique nous avons montré, en nous inspirant des travaux de A.N. Barkhatov [2], que par la mise en œuvre de la technique dite de "diffusion" nous pouvons réaliser dans une couche de liquide une variation verticale de célérité passant par un minimum comme dans le milieu marin réel. Par des mesures acoustiques nous avons validé les diagrammes de transmission acoustique établis à partir de calculs basés sur l'équation parabolique.

### 2. REALISATION DE FONDS STRATIFIES

D'après des mesures réalisées en mer, les fonds marins répondent au schéma suivant et ont pour caractéristiques acoustiques principales :

Coupe de la mer et du fond



# SIMULATION D'ENVIRONNEMENT

Matériaux	Masse volumique kg/m <sup>3</sup>	Vitesse longitudinale m/s	Vitesse transversale m/s	Atténuation dB/m par kHz
Sédiments (argile + sable)	1300 à 2000	1500 à 1750	0	0,1 à 0,25
SOCLE (Roches)	2600	5700	2700	0,03

Après de nombreux essais de matériaux et des études sur la masse volumique, les vitesses de propagation et l'atténuation, nous avons choisi afin de similer les fonds marins :

- pour la couche sédimentaire : de la résine polyuréthane DF 1013 qui, par l'apport d'un durcisseur et en fonction de sa quantité, voit sa vitesse longitudinale varier dans des proportions intéressantes (le DF 1013 ayant une vitesse transversale nulle il se comporte comme un fluide)

- pour le socle semi-infini solide et élastique : de la résine polyester B 2900 additionnée d'alumine et de tungstène en poudre de granulométrie très fine.

Il est possible de prévoir la proportion de charges à rajouter dans le cas de la résine polyester ou de durcisseur pour le DF 1013 afin d'obtenir les caractéristiques acoustiques souhaitées. Le tableau ci-dessous résume toutes les valeurs limites que l'on peut atteindre.

Matériaux	Masse volumique kg/m <sup>3</sup>	Vitesse longitudinale m/s	Impédance	Atténuation dB/m à 500 kHz
Résine polyester + alumine + Tg	1100 à 5000	2500 à 3500	2,75 x 10 <sup>6</sup> à 1,75 x 10 <sup>6</sup>	100
DF 1013	1200	1500 à 1800	2700	400

## 2.1 Etude du coefficient de réflexion des modèles synthétiques

A l'aide d'un formalisme matriciel la théorie de Brekhovskikh généralisée à N couches [3] d'épaisseur finie permet de calculer le coefficient de réflexion des plaques fabriquées à partir des matériaux synthétiques. Une étude comparative entre les valeurs calculées et mesurées nous renseigne sur les qualités de simulation des modèles réduits réalisés. Les courbes théoriques (figure 1) et expérimentales (figure 2) montrent le coefficient de réflexion d'un stratifié composite constitué d'une couche de 5 mm de DF 1013 reposant sur une plaque d'aluminium de 5 mm.

# SIMULATION D'ENVIRONNEMENT

FIGURE 1

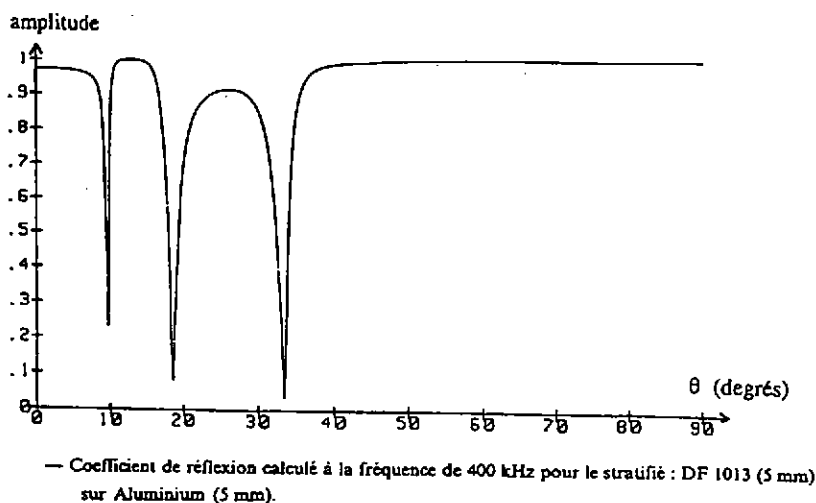
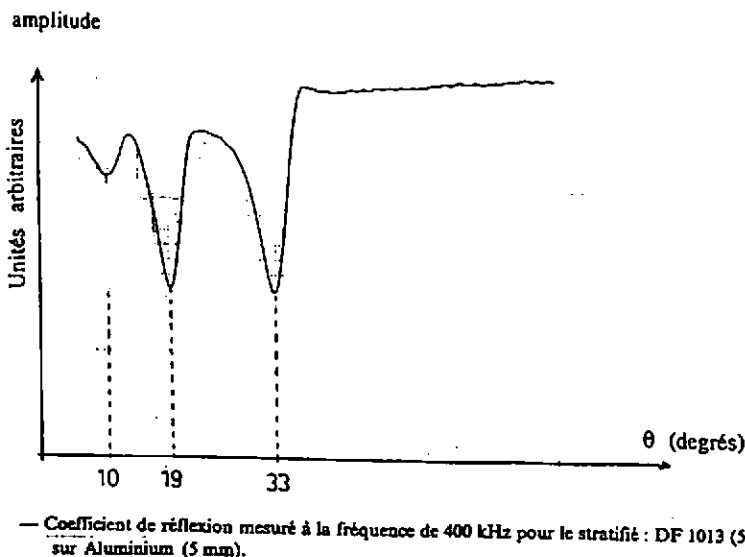


FIGURE 2



On voit que les deux courbes se ressemblent ce qui permet de dire que le DF 1013 se comporte bien comme un fluide conformément aux prévisions. Il en est de même pour la résine polyester chargée avec des poudres métalliques pour simuler le socle rocheux élastique.

## SIMULATION D'ENVIRONNEMENT

### 2.2 Etude du comportement des modèles synthétiques dans la propagation par petits fonds.

On parle de propagation par petits fonds dès que le rapport  $H/\lambda$ , hauteur d'eau sur longueur d'onde, est inférieur à 10. Dans ce cas, pour expliquer les phénomènes de propagation qui en découlent, il est préférable d'utiliser la théorie des modes [4]. Elle fait intervenir de nombreuses réflexions sur la surface et le fond. C'est une propagation de type guidée basée sur un phénomène d'interférence des ondes. Brekhovskikh et Lysanov [5] ont montré que la résolution du problème lié à la propagation par petits fonds consiste à trouver la solution d'une équation caractéristique de la forme :

$$1 + V \exp(2i\alpha H) = 0 \quad (1)$$

Chaque solution de cette équation correspondra à un mode propagatif où  $H$  est la hauteur d'eau considérée et  $\alpha$  un paramètre de même dimension qu'un nombre d'onde.  $V$  est le coefficient de réflexion du fond. Pour connaître les modes existant dans différents cas de figure (fonds fluides, élastiques ou stratifiés) il nous suffira de calculer ce coefficient de réflexion et de l'injecter dans l'équation caractéristique dont les solutions seront caractéristiques du fond envisagé.

La résolution de l'équation (1) dans le cas d'un fond de DF 1013 (Vitesse longitudinale = 1600 m/s; Vitesse transversale = 0 et masse volumique = 1200 kg/m<sup>3</sup>) donne les résultats suivant :

mode n°	fréquences correspondantes
M <sub>1</sub>	0,238 Hz
M <sub>2</sub>	0,234 Hz
M <sub>3</sub>	0,227 Hz

Trois modes sont excités. Grâce à une technique mise au point au laboratoire nous pouvons filtrer les modes apparaissant par petits fonds. En effet, à cause de phénomènes d'interférence dus aux réflexions multiples entre la surface et le fond, le signal reçu est la somme de signaux ayant suivi des trajets différents et se propageant à des vitesses différentes. Il est possible de séparer ces signaux en utilisant les propriétés d'orthogonalité des "fonctions de la profondeur".

Les figures 3a à 4b montrent les relevés expérimentaux effectués dans une lame d'eau de 80 mm de hauteur, à 75 kHz et avec une antenne de 15 capteurs. On met ainsi en évidence le mode M<sub>1</sub> et M<sub>2</sub>. Il en est de même pour le mode M<sub>3</sub>. Comme la théorie le prévoit il y a bien 3 modes qui existent ce qui confirme la capacité du DF 1013 à simuler un fond fluide avec une vitesse longitudinale de 1600 m/s.

Des courbes similaires tracé avec le B 2900 chargé montrent, elles, que cette résine a quelques défauts. Nous utiliserons donc pour reproduire le socle rocheux des plaques de marbre.

# SIMULATION D'ENVIRONNEMENT

## CAS DU FOND DE DF 1013

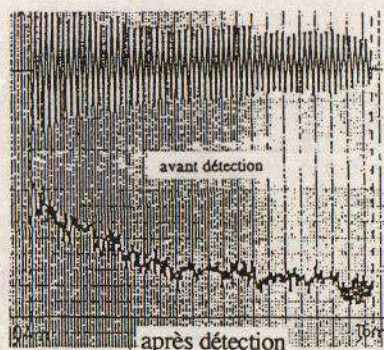


FIGURE 3a

Signal reçu au récepteur en fonction de la distance source-capteur  
(Hauteur d'eau = 82 mm)

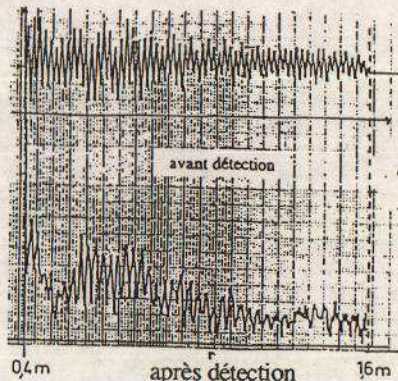


FIGURE 4a

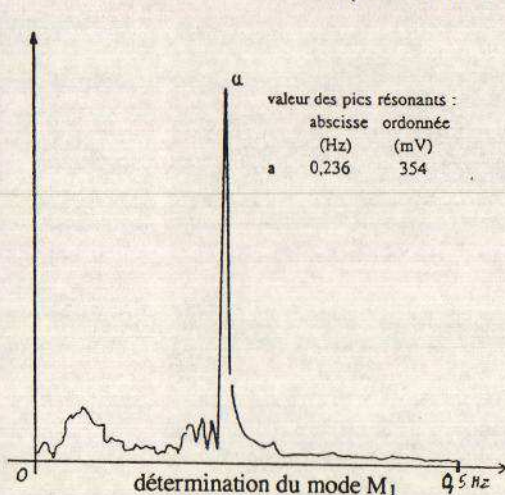


FIGURE 3b

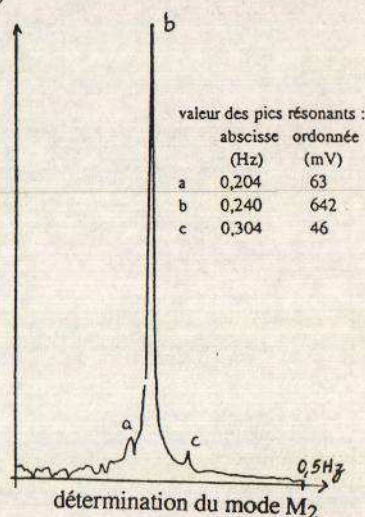


FIGURE 4b

## 2.3 Conclusion sur la réalisation des fonds synthétiques

L'étude expérimentale a révélé l'aptitude des matériaux de synthèse, tels que le DF 1013 et le B 2900 à simuler les couches sédimentaires et le substrat solide élastique constitutifs du fond marin réel. Elle a permis également de valider les résultats théoriques et de confirmer la réalisation des modèles réduits, grâce au bon accord entre les grandeurs mesurées et celles acquises par le calcul.



# SIMULATION D'ENVIRONNEMENT

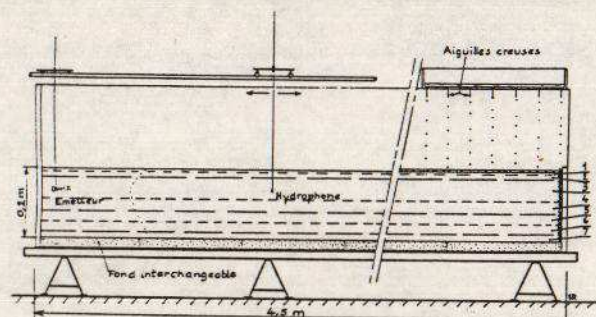
## 3. REALISATION DE BATHYCELERIMETRIE

Le problème à résoudre est de réaliser sur 20 cm de hauteur un profil vertical de célérité équivalent à un profil réel rencontré en mer c'est à dire avec une profondeur de 4000 m et un minimum de célérité à 1000 m. Différents travaux personnels et étrangers [6, 2] ont montré qu'un profil vertical de célérité peut être obtenu en superposant plusieurs liquides avec des densités et des vitesses acoustiques différentes.

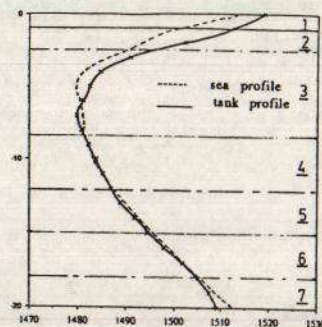
En utilisant 7 liquides judicieusement choisis (cf. tab. 1) nous avons réalisé un profil vertical de célérité réel (cf figure 5) sur une hauteur de 20 cm avec un facteur de réduction de 20 000. Le remplissage de la cuve de mesure est effectué à partir de la surface. Une pluie est créée par des bacs percés de 3000 trous recevant des aiguilles calibrées. Les liquides injectés dans ces bacs coulent goutte à goutte à travers les aiguilles et tombent sur un tapis de mousse polyeter dont le rôle est d'amortir la chute des liquides et d'éviter que chaque couche ne se mélange avec la précédente (cf figure 6). On obtient ainsi sur 20 cm une superposition de 7 couches de densités croissantes avec la profondeur et qui, par diffusion lente, vont établir le profil vertical de célérité souhaité.

Nr and thickness of layers	liquids nature	Density	Sound speed in m/s at 20 °C
(1) e = 1 cm	6 ° GL Ethyl alcohol solution	0.989	1521,1
(2) e = 1,5 cm	2.15 ° GL Ethyl alcohol solution	0.994	1496,9
(3) e = 6 cm	Water	0.998	1482,6
(4) e = 3,5 cm	0.5 % NaCl solution	1.002	1487,3
(5) e = 3 cm	1.1 % NaCl solution	1.006	1494,3
(6) e = 3 cm	1.7 % NaCl solution	1.010	1500,9
(7) e = 2 cm	3.3 % NaCl solution	1.021	1520,6

**TABLEAU 1 :**  
Liste des liquides utilisés dans la réalisation du profil de la figure 5



**FIGURE 6** Cuve d'expérience



**FIGURE 5 :** Profil bathycélérimétrique réalisé

# SIMULATION D'ENVIRONNEMENT

## 4. MESURES ACOUSTIQUES ET COMPARAISON AVEC DES RESULTATS THEORIQUES

La cuve expérimentale équipée de dalles synthétiques (DF 1013 pour simuler un fond fluide ou marbre pour un fond rocheux) sur lesquelles est installé un profil bathycélérimétrique nous permet de reproduire à l'échelle de 1/20 000 ème une propagation acoustique dans 4000 m de hauteur d'eau sur une distance de 90 km. Une source acoustique émettant à 1 MHz est utilisée. Elle émet dans un angle solide de 15 degrés. Cette source est immergée à la profondeur correspondant au minimum de célérité soit 5 cm. La pression acoustique est mesurée avec une sonde placée à 1, 6 et 11 cm d'immersion. Le niveau sonore est tracé en fonction de la distance. Les courbes 4, 5 et 6 montrent en traits pleins ces relevés.

La méthode pour calculer le champ acoustique dans la cuve est basée sur l'équation parabolique [7]. Cette équation est intégrée numériquement par la méthode de Crank-Nicholson à partir d'une solution initiale (starter [8]). Cette solution prend en compte le fait que la source n'est pas omnidirectionnelle (ouverture de 15 degrés). La comparaison entre les résultats théoriques (résultats en traits pointillés) et expérimentaux est montrée figures 7 à 9.

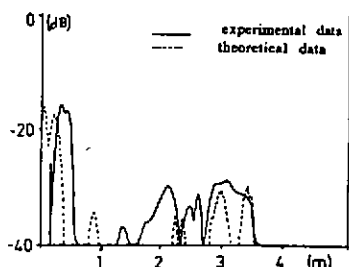


FIGURE 7 : profondeur de la source : 6 cm  
profondeur du récepteur : 1 cm  
fréquence : 1 MHz

FIGURE 8 : profondeur de la source : 6 cm  
profondeur du récepteur : 6 cm  
fréquence : 1 MHz

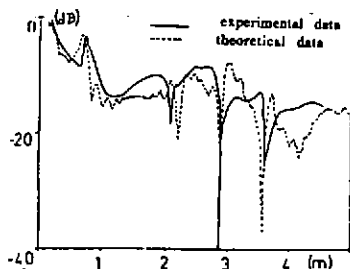
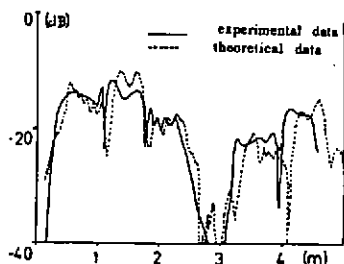


FIGURE 9 : profondeur de la source : 6 cm  
profondeur du récepteur : 11 cm  
fréquence : 1 MHz

## SIMULATION D'ENVIRONNEMENT

### 5. CONCLUSION

En ce qui concerne la simulation des fonds, le problème est résolu dans la mesure où l'on sait reproduire convenablement tous les types de fonds marins. Pour la réalisation d'une bathycélérimétrie simulant un profil vertical de célérité nous avons montré qu'il est possible par une méthode de diffusion de liquides de reproduire un profil bathycélérimétrique marin réel quelconque. En utilisant ces deux techniques nous obtenons une maquette complète très réaliste de la mer et du fond. En comparant des résultats expérimentaux obtenus dans cette cuve et des résultats de calculs numériques deux faits se dégagent :

- il y a un bon accord entre les résultats théoriques et expérimentaux en tenant compte des inévitables approximations de calcul et des erreurs de mesure.

- les régions d'absence et de présence de signal acoustique correspondent à celles trouvées pour la solution numérique.

L'utilisation de cette cuve expérimentale associée avec le calcul du champ de pression par la méthode de l'équation parabolique nous permet d'envisager l'étude de problèmes fondamentaux tels que la caractérisation du milieu marin, la détection et la localisation de sources sonores en présence d'un profil vertical de célérité.

### 6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. RABAU "Modèles géoacoustiques" Thèse de l'université d'Aix Marseille II - 1990
- [2] A.N. BARKHATOV "Modeling of sound propagation in the sea" (1968), translated from russian by Consultants Bureau, New York - London 1971
- [3] J.P. HERAULT, G. RABAU, C. GAZANHES "Propagation dispersive en milieu stratifié : simulation sur modèles réduits", J. Phys. III 1, 389-414 (1991)
- [4] P. CRISTINI "Contribution à l'étude de la propagation sonore en eau peu profonde : influence de la nature du fond sur le champ acoustique dans la lame d'eau" Thèse de l'université d'Aix Marseille II - 1991
- [5] L. BREKHOVSKIKH, Y. LYSANOV "Fundamentals of ocean acoustics" Springer Verlag Berlin Heidelberg (1982)
- [6] J. PIRAUX, J. LEANDRE, R. HOLTZER, G. RABAU, J.L. ARNAUD "Simulation d'environnement en acoustique sous-marine" Rapport final, DCAN TOULON (1992)
- [7] R.R. GREENE "The rational approximation to the acoustic wave equation with bottom interaction", J.A.S.A. 76, 1764-1773 (1984)
- [8] D.J. THOMSON, N.R. CHAPMAN "A wide-angle split step algorithm for the parabolic equation", J.A.S.A. 74, 1848-1854 (1983)