



**HAL**  
open science

# ÉVALUATION DE DIVERSES MÉTHODES DE DIAGNOSTIC ACOUSTIQUE D'UN FOND MARIN STRATIFIÉ

R. Bohbot, D. Lesselier, W. Tabbara

► **To cite this version:**

R. Bohbot, D. Lesselier, W. Tabbara. ÉVALUATION DE DIVERSES MÉTHODES DE DIAGNOSTIC ACOUSTIQUE D'UN FOND MARIN STRATIFIÉ. *Journal de Physique Colloques*, 1990, 51 (C2), pp.C2-997-C2-1000. 10.1051/jphyscol:19902233 . jpa-00230561

**HAL Id: jpa-00230561**

**<https://hal.science/jpa-00230561>**

Submitted on 4 Feb 2008

**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.

## ÉVALUATION DE DIVERSES MÉTHODES DE DIAGNOSTIC ACOUSTIQUE D'UN FOND MARIN STRATIFIÉ

R. BOHBOT, D. LESSELIER et W. TABBARA

*Equipe Electromagnétisme, Laboratoire des Signaux et Systèmes  
(CNRS-ESE), F-91192 Gif-sur-Yvette Cedex, France*

**Résumé :** Quatre méthodes de sondage acoustique du fond marin à partir du champ qu'il réfléchit quand il est insoné par une onde plane sont discutées à partir de données synthétiques. La première basée sur une approximation d'acoustique géométrique et la seconde sur la réponse à un signal incident de type échelon sont appliquées à deux configurations types d'un sédiment fluide reposant sur un socle solide. Les deux dernières, l'une exacte du type Gel'fand-Levitan, l'autre basée sur une approximation de Born, visent à reconstruire les profils de densité et de célérité d'un fluide inhomogène (cas limite d'un sédiment d'épaisseur très grande).

**Abstract :** Four methods of acoustical probing of the ocean floor from the field reflected under plane-wave insonification are discussed from synthetic data. The first one based on a geometrical acoustics approximation and the second which uses the response to a step waveform are applied to two typical configurations of a fluid sediment lying on a solid subbottom. The last two, an exact Gel'fand-Levitan-like technique, the other based on Born's approximation, aim at probing density and velocity profiles of an inhomogeneous fluid (limiting case of a very thick sediment).

### INTRODUCTION

Les paramètres acoustiques du fond marin jouent, dans la propagation des ondes sonores, un rôle prépondérant lorsque les fonds sont faibles, approximativement moins de 10 fois la longueur d'onde du son dans l'eau. Les difficultés de mesures directes à partir d'échantillons prélevés in situ ont conditionné ces dernières années le développement de diverses procédures d'identification à partir de la réponse du milieu à une excitation acoustique. Mais les nombreux travaux théoriques menés pour la résolution de ce problème inverse de diffraction semblent avoir peu été suivis d'applications numériques, même dans le cas a priori simple d'une configuration stratifiée plane modélisant le fond marin /1/.

Nous nous intéressons ici à diverses méthodes de diagnostic d'un tel fond marin stratifié plan, notre but étant de construire le profil de ses paramètres acoustiques (vitesses et atténuations des ondes de compression et/ou de cisaillement, densités) à partir du champ de pression réfléchi lors d'une insonation par ondes planes.

Dans la première partie le milieu sondé est constitué d'une couche fluide homogène (le sédiment) reposant sur un solide homogène semi-infini (le socle). Deux méthodes sont développées; l'une, basée sur une approximation d'Acoustique Géométrique, opère dans le domaine fréquentiel, l'autre, exacte, dans le domaine temporel. Leurs performances sont analysées sur deux configurations types du fond marin, l'une à forts contrastes de vitesses et densités, l'autre à faibles contrastes, correspondant respectivement à une couche sableuse reposant sur un socle "dur", et à une couche argileuse continuée par un socle de propriétés presque identiques /2/.

Dans la seconde partie, le milieu sondé est supposé fluide de profils de densité et de célérité à variations "assez" douces (ce qui peut correspondre au cas d'un sédiment de grande épaisseur). Deux méthodes de diagnostic, l'une exacte, développé par Coen /3/ à partir d'une transformation adéquate de l'équation d'onde et qui permet de déterminer simultanément les deux profils, l'autre qui fournit un profil d'impédance approché en fonction d'un temps de parcours (impédiographie), sont étudiées.

### 1. IDENTIFICATION DE L'EMPILEMENT HOMOGENE FLUIDE/SOLIDE

Le modèle est celui de la figure 1. Une couche sédimentaire fluide horizontale d'épaisseur  $d$ , de densité  $\rho_2$  supportant des ondes de compression de célérité  $c_2$ , repose sur un socle solide de densité  $\rho_3$  où se propagent des ondes de compression de célérité  $c_p$  et des ondes de cisaillement de célérité  $c_s$ , l'eau ayant pour paramètres  $c_1$  et  $\rho_1$ . Les pertes par absorption, supposées varier linéairement avec la fréquence, interviendront dans les constantes de propagation  $k_i = \omega/c_i$  et  $k_i = \omega/c_i + j\omega\alpha_i$  avec  $i = 2, P, S$  en sous-entendant une dépendance temporelle des champs en  $e^{-j\omega t}$ . On suppose que le milieu est insoné sous l'incidence  $\theta$  par une onde plane (la source est située à l'infini dans l'eau, l'interface eau-air n'est plus représentée).

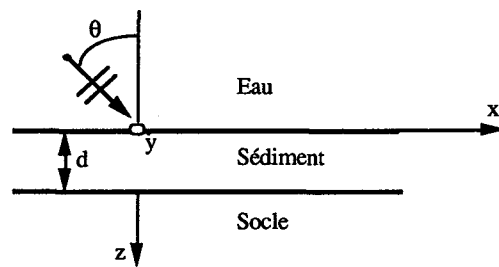


Figure 1

### 1.1 Méthode de l'Acoustique Géométrique

Dans l'approche géométrique, le champ réfléchi est exprimé en terme de rayons réfléchis et/ou transmis aux différentes interfaces. Le coefficient de réflexion correspond alors à une superposition de réflexions multiples locales et l'approximation consiste à ne retenir que les deux premiers rayons réfléchis. L'expression de ce coefficient de réflexion se réduit alors à  $R(\omega, \theta) = R_{12} + T_{12}R_{23}T_{21} \exp(2jk_z d)$  dans laquelle  $k_z$  désigne la composante verticale du vecteur d'onde dans le sédiment,  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $T_{12}$  et  $T_{21}$  les coefficients de Fresnel, l'argument de l'exponentielle traduisant le déphasage de l'onde lors du trajet aller-retour dans le sédiment. Une étude récente du problème direct /2/ a montré les bonnes performances à toutes les fréquences de cette approximation, bien qu'elle soit "haute fréquence" par nature.

Outre sa simplicité, cette formulation présente une particularité qui est à la base de l'inversion. En effet, toute l'information relative au sédiment se trouve dans le déphasage et le coefficient local  $R_{12}$  tandis que celle concernant le socle réside entièrement dans le coefficient local  $R_{23}$ . Le diagnostic s'effectue donc en deux étapes, la connaissance de  $R$  à plusieurs incidences et fréquences permettant le calcul des paramètres du sédiment, puis celui de ceux du socle.

Décrivons brièvement la méthode, détaillée en /4/. D'abord,  $R_{23}$  est éliminé. Pour ce faire, trois fréquences à incidence donnée mènent à une équation non linéaire d'inconnues  $d$  et  $k_z$ . Une seconde incidence fournit un système dont la résolution numérique (l'algorithme est décrit en /5/) donne  $d$  et  $k_z$ , dont on déduit  $c_2$  et  $\alpha_2$ . Il est alors facile de calculer  $R_{12}$  et d'avoir accès via la formule approchée à  $R_{23}$ . Du système formé par  $R_{23}$  à cinq incidences (trois si on suppose le socle sans pertes), on peut maintenant en extraire  $k_p$  et  $k_s$  et par conséquent  $c_p$ ,  $\alpha_p$ ,  $c_s$  et  $\alpha_s$ , la résolution s'effectuant au moyen d'un algorithme de Newton modifié. Notons que, au terme de chaque étape, la densité est connue analytiquement dès que les autres paramètres le sont. Par ailleurs, négliger le cisaillement dans le socle conduit directement à une expression analytique de  $\rho_3$  et  $k_p$ ; on reconstruit alors de façon unique un socle fluide équivalent.

### 1.2 Réponse à l'échelon

L'inversion est basée sur la réponse de la structure à un signal incident en échelon. Cette réponse est constituée d'une séquence infinie de paliers dont le premier est caractéristique du sédiment seul, l'information concernant le socle étant contenue dans le second. Leur identification à diverses incidences et une procédure très analogue à celle utilisée précédemment donnent les paramètres recherchés.

### 1.3 Résultats numériques

L'inversion géométrique conduit généralement à un petit nombre de sédiments et, pour chacun d'eux, soit à un nombre important de socles si celui-ci est solide, soit à un seul s'il est assimilé à un fluide. Les résultats dépendent fortement du type de configuration considéré, des fréquences de travail et des angles d'incidence utilisés. Les meilleurs sont obtenus dans le cas du modèle à faibles contrastes, à basses fréquences et incidences (Fig. 2). La densité  $\rho_3$  des socles solides reconstruits varie alors de manière hyperbolique en fonction de la vitesse des ondes de compression  $c_p$ , en passant non loin de la solution exacte, et l'impédance  $\rho_3 c_p$  restant, logiquement, une constante proche de la valeur exacte. A l'opposé, la meilleure reconstruction du modèle à forts contrastes s'effectue à incidences et fréquences élevées. Notons enfin que c'est le modèle pour lequel la procédure, aux faibles incidences, ne fournit aucune solution.

L'inversion de la réponse à l'échelon fournit toujours la solution exacte si cette réponse est parfaitement connue. Pratiquement, elle conduit à une ou plusieurs valeurs dont les écarts par rapport à la valeur exacte dépendent de la précision de la réponse. Ainsi avec une réponse simulée par transformée de Fourier du rapport  $R(\omega)/j\omega$  sur la bande de fréquence  $[0, 5 \text{ kHz}]$ , l'erreur sur les paramètres sédimentaires n'excède pas quelques pourcents. Mais celle-ci reste trop importante pour retrouver le socle puisque celui-ci n'est alors reconstruit que très médiocrement (approximativement 20% d'erreur).

## 2. SONDAGE DU FLUIDE INHOMOGENE

Dans cette partie, le fond marin est constitué d'un sédiment de très grande épaisseur, modélisé par un demi-espace fluide inhomogène à variation continue de paramètres  $\rho(z)$  et  $c(z)$ . La géométrie du problème est celle de la figure 1 avec un socle rejeté à l'infini.

### 2.1 L'impédiographie

Cette technique découle de l'introduction du temps de propagation  $\tau$  par  $d\tau/dz = \cos\theta(z)/c(z)$ , l'angle  $\theta(z)$  obéissant à la loi de Descartes  $\sin\theta(z)/c(z) = \sin\theta_1/c_1$ . En effectuant cette transformation dans l'équation d'Helmholtz et en se plaçant dans l'hypothèse de Born (milieux peu diffringents), l'impédance du milieu sondé  $Z_{\theta_1}(\tau) = (\rho c/\cos\theta)(\tau)$  apparaît liée à sa réponse impulsionnelle  $h_{\theta_1}$ , i.e.,  $d\ln Z_{\theta_1}(\tau)/d\tau = 4 h_{\theta_1}(\tau)$ , en remarquant que la connaissance de l'impédance à deux incidences ne semble pas permettre pas d'identifier séparément densité et célérité.

### 2.2 La méthode exacte

La procédure développée par Coen /3/ reconstruit simultanément les profils de densité et de célérité à partir de la réponse impulsionnelle à deux incidences. Elle est basée sur l'introduction d'une profondeur apparente  $s$  définie par  $ds/dz = \rho_2(z)/\rho_2(0)$ , ce qui permet de transformer l'équation de propagation en incidence oblique en une équation en incidence normale relative à un milieu équivalent dont l'indice de réfraction dépend des deux paramètres acoustiques cherchées et de l'incidence. Une transformation de Liouville conduit alors à une équation de Schrödinger dont la résolution par la technique de Gel'fand-Levitan /6/ et une procédure numérique pas-à-pas /7/ produit directement l'indice de réfraction, indice dont la connaissance à deux incidences fournit les deux profils cherchés  $\rho(z)$  et  $c(z)$ .

### 2.3 Les contraintes des deux méthodes

Elles sont doubles. D'une part, le milieu sondé doit être non absorbant et d'autre part, son profil d'impédance doit être suffisamment régulier (deux fois continuellement différentiable pour l'algorithme de Coen contre une fois pour l'impédiographie). Cependant, il faut insister sur le fait que ces deux méthodes fournissent des résultats intéressants même lorsque ces conditions ne sont plus remplies.

### 2.4 Résultats numériques

Des profils polynomiaux ont été utilisés. Ils correspondent à une variation des paramètres dans une couche sédimentaire de 10 mètres d'épaisseur reposant sur un socle fluide homogène semi-infini. Considérons le cas du profil deux fois continuellement différentiable de la figure 3. Les réponses impulsionnelles du milieu sont calculées à deux incidences ( $0^\circ$  et  $20^\circ$ ). En l'absence de pertes, le profil est parfaitement reconstruit à l'aide de la méthode exacte, ce qui n'est pas surprenant puisque les contraintes sont satisfaites. En présence de pertes (0.5 dB/m/kHz), on observe à toutes les profondeurs une élévation du profil de densité et un affaissement du profil de célérité, le profil d'impédance n'étant pratiquement pas modifié. Les performances de cette méthode vis-à-vis d'un bruit de mesure obtenu par simple troncature numérique de la réponse impulsionnelle sont honorables. Une troncature au delà de la deuxième décimale n'altère pas les reconstructions. Mais celles-ci échouent avec une troncature à la première décimale. L'approche impédiographique (Fig. 4) se révèle quant à elle robuste tant vis-à-vis des pertes que du bruit de mesure, mais se dégrade fortement quand l'incidence augmente (une dizaine de degrés apparaît comme une limite supérieure); à faible incidence, elle permet une bonne reconstruction de l'impédance jusqu'à la transition sédiment-socle, l'impédance constante du socle étant ensuite notablement sous-estimée.

## REFERENCES

- /1/ LESSELIER, D. et TABBARA, W., J. Acoust., 1 (1989) 363.
- /2/ GRASSIN, P. et al., J. Acoust., 2 (1989) 241.
- /3/ COEN, S., Geophys., 46 (1981) 1244.
- /4/ BOHIBOT, R. et al., à paraître, Proc. IEEE 1989 Ultrasonics Symp., Montréal (1989).
- /5/ TIJHUIS, A. G., *Electromagnetic Inverse Profiling : Theory and Numerical Implementation*, VNU Science Press, Utrecht (1987).
- /6/ KAY, I., *Mathematics of Profile Inversion*, Ed. Colin, NASA TM X-62, 150 (1972) 6-2.
- /7/ KRITIKOS, H. N. et al., Proc. IEEE, 70 (1982) 295.

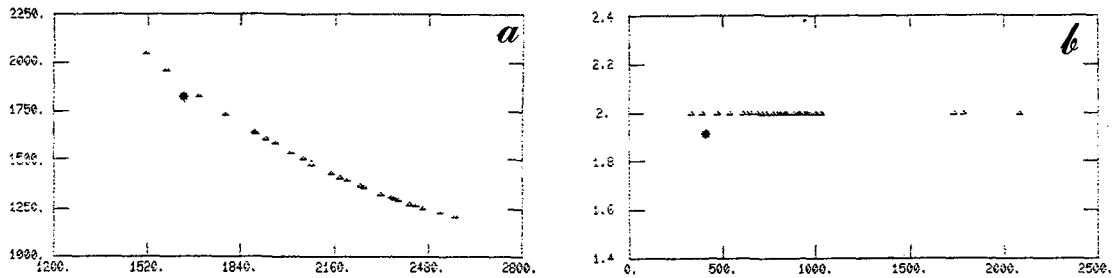


Fig. 2 : Reconstruction du modèle à faibles contrastes (cf. /2/) par la méthode de l'Acoustique Géométrique. Distribution des socles (26) reconstruits à basse fréquence et incidence en l'absence de pertes. Le symbole \* désigne la solution exacte.  
 (2a) Dépendance hyperbolique de la densité par rapport à la célérité des ondes de compression.  
 (2b) Dépendance de l'impédance normalisée par rapport à la célérité des ondes de cisaillement.

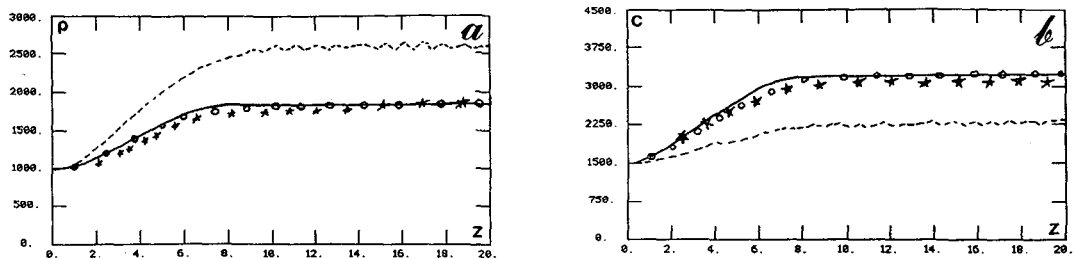


Fig. 3 : Reconstruction des profils de densité (a) et de célérité (b) d'un milieu fluide par la méthode exacte. — : profil exact, o o o : reconstruction en l'absence de pertes, - - - : reconstruction en présence de pertes, \* \* \* : reconstruction en présence de pertes et de bruit numérique obtenu par troncature de la réponse impulsionnelle au delà de la deuxième décimale.

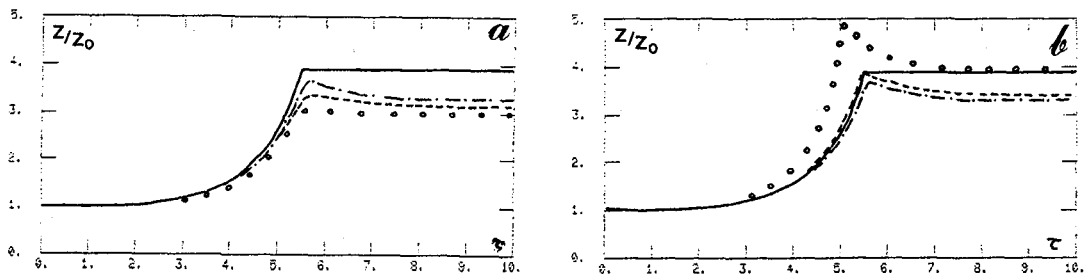


Fig. 4 : Impédiographie d'un milieu fluide à variation continue de paramètres (— : profil exact).  
 (4a) Reconstruction en incidence normale en l'absence de pertes (- - -), en présence de pertes (- - -), de pertes et de bruit numérique obtenu par troncature des décimales de la réponse impulsionnelle (o o o).  
 (4b) Influence de l'incidence. Reconstruction à 0° (- - -), 10° (- - -) et 20° (o o o).