

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA STATIONNARITE DU MILIEU MARIN SUR UN CAS DE PROPAGATION ACOUSTIQUE MOYENNE DISTANCE

Faure B., Mauuary D., Vial F.

CEPHAG, ENSIEG (URA 346-CNRS)
bp 46, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex - France

RESUME

L'objectif de cette présentation est l'étude de la stationnarité à plusieurs échelles de temps du milieu marin lors d'une configuration de propagation moyenne distance en Méditerranée. Des données recueillies dans le cadre d'une campagne de tomographie acoustique océanique sur une durée de deux mois sont présentées. Nous décrivons les conditions expérimentales les signaux utilisés ainsi que les méthodes d'extraction de l'information. La comparaison dans le temps des différentes réponses impulsionnelles obtenues montre des variabilités sur plusieurs échelles temporelles.

1. Introduction

Les causes de la non stationnarité du milieu marin sont multiples et en fonction de l'échelle de temps de l'évolution du milieu, il est possible de mettre en cause : les ondes internes, les courants, les déplacements de bulles chaudes ou froides, le bruit d'origine diverse etc. Avant d'effectuer cette recherche de responsabilité et de mettre en oeuvre des méthodes avancées de Tomographie Acoustique Océanique, il est nécessaire d'avoir une idée (à défaut de chiffrer) de l'ordre de grandeur de la stationnarité du milieu concerné. Pour cela plusieurs méthodes sont possibles et notamment le calcul de la fonction d'interambiguïté signal reçu/signal émis lors d'une excitation appropriée du milieu. Cette méthode a l'avantage de fournir une image temporelle et fréquentielle des différentes évolutions. Toutefois, à moindre coût, il est possible pour les mesures dans le domaine fréquentiel, d'utiliser la méthode classique de la corrélation sortie-entrée sur des émissions récurrentes et de suivre l'évolution de la phase, lorsqu'il y a présence de signal, de cette fonction au cours du temps. C'est ce que l'on propose de développer ici dans le cadre d'une expérimentation faite par le CEPHAG pendant la campagne de tomographie THETIS (MAST I) en Mer Méditerranée.

2. Description de l'expérimentation support de l'étude

2-1 Configuration

Nous avons traité dans cette étude des données issues d'un émetteur mouillé à 150 m sur des fonds de 2400 m et un récepteur fixe distant de 134 km et situé sur le talus continental à

ABSTRACT

The aim of this paper is to study the stationarity of the underwater medium on several time scales through a propagation experiment in Mediterranean Sea. Data collected during a two months duration tomography experiment are presented. We describe the experimental plan, the signals to be used and the signal processing methods to extract the information. The comparison in time of the experimental impulse responses exhibit some variability of different time scale.

une immersion de 50 m. A l'aplomb du récepteur, le fond est à 55 m. Les conditions de propagation sont rendues difficiles par la présence du talus continental qui limitera le nombre de rayons propres reçus.

Lors de cette campagne de mesures, le signal émis est une succession de 20 séquences BPSK construites à partir de SBLM de produit bande-durée = 511, centrées autour d'une fréquence porteuse de 400 Hz. L'échantillonnage temporel des excitations du milieu est variable sur une durée de deux mois. La fonction de corrélation d'un tel signal permet une résolution en temps des différents trajets de l'ordre de 10 ms.

2-2 Signaux

Le signal est une répétition de M séquences d'un signal BPSK large-bande de durée T modulé autour d'une fréquence porteuse f_0 :

$$e(t) = c_{[T]}(t) \exp(j2\pi f_0 t).$$

où $c_{[T]}$ est le code du PSK de période T. Le signal reçu après propagation dans le milieu océanique et après démodulation est alors classiquement donné par le modèle à trajets multiples suivant;

$$r(t) = \sum_{j=1}^P a_j(t) c_{[T]}(t - \tau_j(t)) \exp(-j2\pi f_0(1 - \tau_j(t))) + b(t), \quad 0 \leq t \leq MT.$$

Il est important de noter que les paramètres du modèle sont a priori fonction du temps puisque c'est là l'objet de notre analyse. A l'échelle de la durée de réception des signaux qu'on appellera échelle instantanée, on supposera que les variations de $\tau_j(t)$ sont linéaires et $a(t)$ constant, ou:

$$\begin{aligned} \tau_j(t) &= \tau + \mu_j t, \\ a_j(t) &= a_j. \end{aligned}$$



On décrit ainsi les phénomènes de variabilité instantané comme des phénomènes Doppler. Le modèle peut alors s'écrire :

$$r(t) = \sum_{j=1}^P a_j c_T(jt - \tau_j) \exp(-j2\pi f_0 k_j t) + b(t), \quad 0 \leq t \leq MT,$$

avec $k_j = 1 - \mu_j$ et en incorporant le terme de phase $\exp(-j2\pi f_0 \tau_j)$ dans l'enveloppe c_T . La phénoménologie du Doppler peut-être relativement complexe. Par exemple, les variations propres du milieu tels que les courants ne seront pas dissociables des mouvements des instruments. En effet, si l'on reprend la relation générale d'une transmission sonore unilatérale entre deux points mobiles [1], les fréquences à l'émission et à la réception sont liées par la relation :

$$\frac{f_R}{f_E} = \frac{C_0 + V_m - V_R}{C_0 + V_m - V_E}$$

dans laquelle :

c_0 est la célérité du son dans le milieu supposé immobile,

V_E, V_m, V_R sont les projections des vecteurs vitesses de l'émetteur, du milieu de propagation et du récepteur sur la droite orientée émetteur-récepteur (sens de la propagation) prise comme référentiel fixe.

Si le récepteur est fixe comme c'est le cas dans notre exemple, cette expression devient:

$$\frac{f_R}{f_E} = \frac{C}{C - V_E} = \frac{1}{1 - \frac{V_E}{C}} \approx 1 + \frac{V_E}{C}$$

après avoir posé : $C_0 + V_m = C$

On constate alors que le mouvement du milieu de transmission (contribution des courants) n'est perceptible que si l'émetteur et/ou le récepteur sont en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre.

Le premier outil qui permet d'analyser le Doppler dans les signaux est la fonction d'ambiguïté directement issue de la théorie de l'estimation au sens du maximum de vraisemblance appliqué à l'estimation de μ_j . Le modèle devient alors :

$$\Phi_{rc}(t, f) = \sum_{j=1}^P a_j \Phi_{cc}(t - \tau_j, f - f_j) + \Phi_{bc}(t, f), \quad 0 \leq t \leq MT.$$

où :

$$\Phi_{rc}(t, f) = \int_{[MT]} r(t) c_T^*(t - \tau) \exp(-j2\pi f t) dt$$

Le deuxième outil que l'on propose est une ligne à retard de constante T qui fournit un modèle bidimensionnel ($r_l(t) = r(t + iT)$) après filtrage adapté :

$$\Gamma_l(t) = \sum_{j=1}^P a_j \Gamma_{cc}(t - \tau_j) \exp(-j2\pi f_0 \mu_j T l) + b(t),$$

$$0 \leq t \leq T, \quad i = 0, M-1$$

où :

$$\Gamma_{rc}(t) = \sum_{[T]} r(u) c_T^*(u - t) du$$

On néglige alors le Doppler sur la longueur T d'une séquence BPSK. La mesure Doppler se fait alors sur les phases

$\phi_j = 2\pi f_0 \mu_j T$, phases de la fonction d'intercorrélation $\Gamma_i(t)$ pour $t = \tau_i$ par une simple régression linéaire. Cette méthode s'avère équivalente à l'estimation Doppler par ambiguïté dont la précision est asymptotiquement donnée par :

$$\sigma^2 = \frac{1}{f_0^2 R T_e^2}$$

où R est le rapport signal sur bruit et T_e la durée efficace du signal utilisé. Les signaux utilisés sont en outre très peu résolus en temps ce qui peut gêner considérablement les mesures individuels de Doppler par cette méthode. On supposera alors que des groupes de trajets proches subissent les mêmes effets Doppler, ce qui est observé expérimentalement.

3. Etude des variations instantannées à courte échelle temporelle

3-1. Prédiction par modélisation classique

Compte tenu des paramètres d'immersion de l'émetteur et du récepteur, de la distance de propagation, du profil de célérité moyen dans la zone de travail et des conditions d'interface du fond assez difficiles à cause de la présence du talus continental, la modélisation géométrique permet toutefois de prédire la réponse impulsionnelle du milieu. La figure 1a) montre les rayons propres arrivant sur le récepteur. La réponse impulsionnelle calculée du milieu est présentée sur la figure 1 b). Nous constatons que pour ces conditions expérimentales, le support temporel est limité à quelque 150 ms avec des concentrations de rayons très marquées. Pour cette représentation, nous avons pondéré de façon arbitraire les amplitudes des différentes arrivées par l'angle de tir ce qui se justifie par le fait que plus l'angle de tir est petit, plus le chemin parcouru est faible et par conséquent moins atténué. La présence d'un nombre important de rayons, pour une date donnée, conduira à des interférences entre les rayons au niveau du récepteur. Il est aisé de penser que si le milieu évolue et cela pour plusieurs raisons : modification en un, voire plusieurs points, du profil de célérité, présence de courant modifiant la position de l'émetteur, les figures d'interférence seront différentes. La question est alors de savoir à quelle vitesse ces figures évolueront ? Ce que l'on peut traduire par : quelle est la durée de stationnarité du milieu ?

3-2. Mesures

Sur des échelles de temps courtes de l'ordre de 2 minutes, correspondant à la durée totale d'une séquence, le milieu est quasiment stable dans l'espace temporel comme le montre la figure 2. Cette figure représente, pour trois séquences séparées d'une heure approximativement, les modules des meilleurs coupes fréquentielles des fonctions d'interambiguïté pour les 20 récurrences reçues et traitées.

Pour chaque séquence, si l'on considère l'espace fréquentiel, il est possible de mettre en évidence des variations sensibles qui peuvent être révélées simplement en comparant les phases de chaque fonction de corrélation. Cette méthode est moins lourde que le calcul des fonctions d'interambiguïté et fournit des informations comparables lorsque les variations sont de faibles amplitudes. La figure 3 présente la succession des modules ainsi que la repartition de la phase du maximum de la fonction au cours du temps sur les signaux tels qu'ils sont reçus, puis après correction par régression linéaire sur le support temporel. La superposition des fonctions de phase, figure 4, est parfaite aux instants où le signal est présent. Le terme de correction est équivalent à une variation de vitesse que l'on peut alors mesurer

pour chaque réception. Cette succession de mesures donne une idée des variations de stabilité au cours du temps. Nous avons collecté figure 5 les différentes séquences reçues, et pour chacune, nous avons fait figurer le rapport signal sur bruit maximal ainsi que le coefficient de correction à appliquer aux signaux de façon à obtenir la meilleure concentration de la phase. La répartition des coefficients mesurés montre que la valeur moyenne correspond à $-1.23 \cdot 10^{-5}$ et que l'écart type est de $0.45 \cdot 10^{-5}$ ce qui correspond à des variations de vitesse de l'ordre de 0.6 cm par seconde.

Il est important de qualifier les mesures effectuées en chiffrant les barres d'erreurs qui seront directement liées au rapport signal à bruit.

4. Etude des variations moyennes à grande échelle temporelle

A l'échelle de plusieurs minutes, voire quelques heures, nous constatons que la réponse impulsionnelle est globalement conservée (figure 2) bien que la structure fine des rayons évolue légèrement d'une séquence à l'autre. Par contre, dès que l'intervalle temporel excède 24 heures, la composition des trajets bien qu'occupant toujours le même support, forme des structures très différentes. Cela est directement visible sur la figure 6 où nous avons répertorié les trente résultats obtenus tout au long des deux mois d'analyse. De manière à comparer sans erreurs les réponses impulsionnelles successives, nous avons sommé de façon cohérente tous les signaux reçus provenant d'une même séquence d'excitation tel que cela a été présenté précédemment. Nous constatons très nettement que la réponse du milieu est très évolutive au cours du temps et qu'au delà de 48 heures la composition des trajets de propagation est telle, surtout pour ceux qui ont transité dans le chenal de propagation, qu'il est impossible, compte tenu de la résolution d'analyse, de suivre les rayons individuellement. La seule information que l'on pourra conserver est la fonction moyenne de toutes les excitations.

5. Conclusion

Cette étude dont l'objectif est de permettre de qualifier la stationnarité du milieu marin dans un cas de propagation moyenne distance, montre que l'on peut utiliser une méthode relativement simple pour suivre les évolutions instantanées à courte échelle temporelle. Celle-ci est basée sur l'étude de la phase de la fonction de corrélation lorsque le signal est présent à la réception. Nous avons pu, malgré des conditions expérimentales difficiles dues à la présence du talus continental, étudier et analyser sur plusieurs échelles de temps la stationnarité du milieu marin en utilisant des signaux d'excitation appropriés. Sur quelques minutes, les variations instantanées sont de toute évidence liées à des déplacements relatifs des instruments quant aux variations à plus grande échelle, elles sont directement attribuables à des modifications de milieu qui entraînent des changements de structures importants par le fait même d'interférences entre trajets.

Remerciements

Cette étude a été possible grâce à la collaboration de l'IFREMER responsable de l'expérimentation et du CERDSM pour le prêt du matériel d'écoute.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Faure B., Mauuary D. Procès verbal d'écoute des ERATOs à partir du polygone du Brusc (06 et 07 février 1992). Rapport Cephag 07/92.
- [2] Faure B., Mauuary D. Identification d'arrivées acoustiques avec interfaces surface fond. 2èmes journées d'études : Transmissions acoustiques sous marines. Brest 5 - 6 nov 1992
- [3] Mauuary D., Faure B., Jourdain G. Simultaneous delay and Doppler measurements in SOFAR multipath propagation. Luxembourg septembre 1992
- [4] Munier J. Effet Doppler et réverbération en acoustique, modèle de filtres inhomogènes. Rapport Cephag 35/74

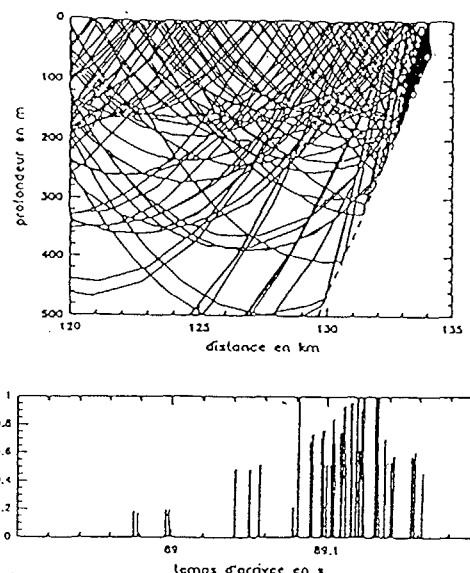


Figure 1 :
a) rayons propres reçus sur le récepteur en présence du talus continental (tracé géométrique),
b) réponse impulsionnelle théorique du milieu.

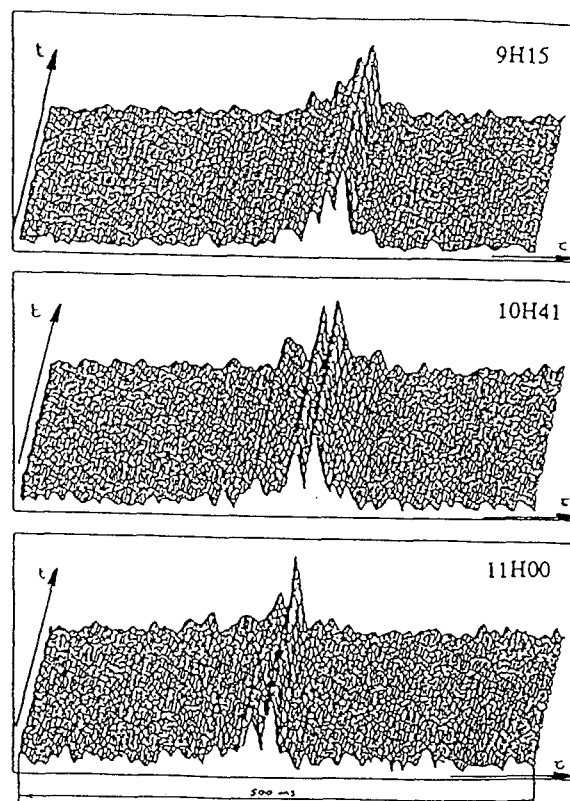


Figure 2 : réponses impulsionnelles expérimentales de durée 2 minutes reçues à 9H15, 10H41, 11H00.

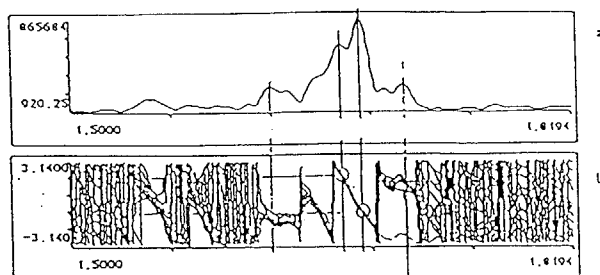


Figure 3 : module et phase (à l'instant du pic) des fonctions d'interambiguïté avant [(a) et b)] et après correction [(c) et d)].

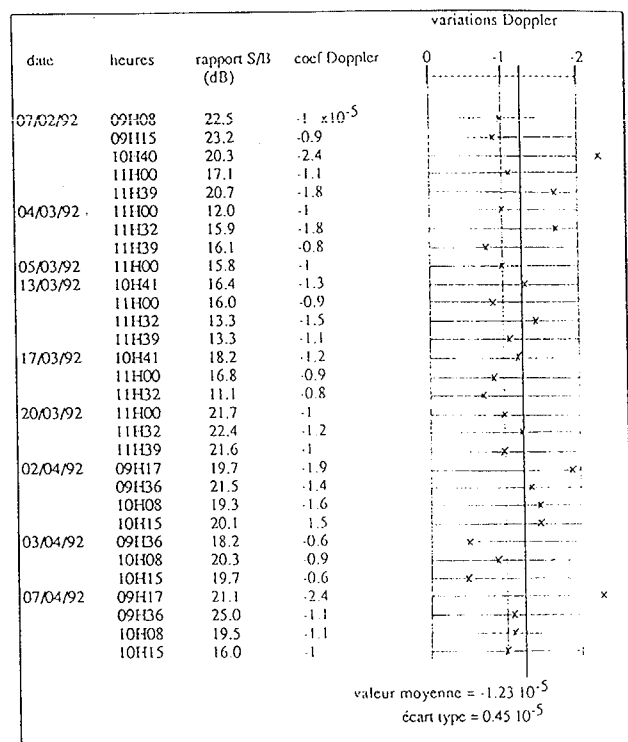


Figure 5 : tableau récapitulatif des différentes réceptions.

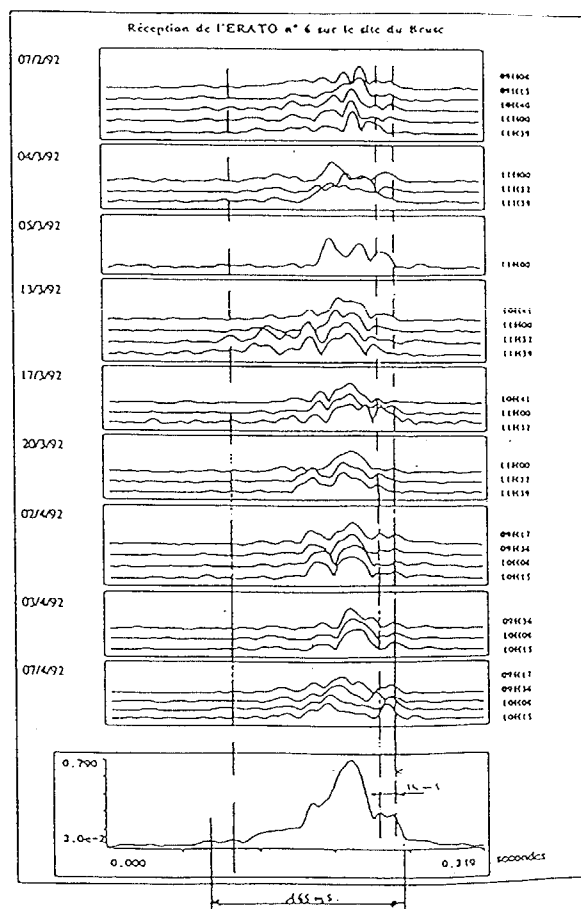


Figure 6 : évolution au cours du temps des différentes réponses impulsionnelles expérimentales.