ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE LARGE BANDE EN ACOUSTIQUE SOUS-MARINE

Jean-Baptiste Faure, F. Bancel

► To cite this version:

Jean-Baptiste Faure, F. Bancel. ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE LARGE BANDE EN ACOUSTIQUE SOUS-MARINE. Journal de Physique Colloques, 1990, 51 (C3), pp.C3-53-C3-61. 10.1051/jphyscol:1990306 . jpa-00230734

HAL Id: jpa-00230734

<https://hal.science/jpa-00230734>

Submitted on 1 Jan 1990

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.

ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE LARGE BANDE EN ACOUSTIQUE SOUS-MARINE

B. FAURE et F. BANCEL

Laboratoire CEPHAG, CNRS URA-346, BP 46, F-38402 Saint-Martin d'Hères, France

Résumé - Nous nous intéressons dans cette étude à l'identification des trajets de propagation en acoustique sous-marine. La mesure des dates d'arrivée est rendue possible par l'utilisation d'émission de signaux large-bande, quant à l'estimation des sites d'arrivée des différents trajets, elle est obtenue en utilisant une antenne verticale. Pour cette phase de localisation, nous utilisons deux méthodes basées sur la technique de la formation de voies, utilisant toute la bande fréquentielle du signal émis, soit directement sur les signaux reçus, soit en sortie d'un filtrage adapté. Nous montrons sur des signaux expérimentaux les résultats obtenus par les deux méthodes. Le mode de représentation fréquence temporelle-site visé est riche en phénomènes propres à la propagation que l'on se propose d'interpréter.

Abstract - In this study, we are interested in the identification of underwater acoustic propagation paths. The measurement of time delay is possible by using of wide band emission signals. As for estimation of arrival angle sights of the different multipaths, it is obtained by means of a vertical antenna. For this localisation, we make of two methods based on the beamforming technic, using the whole frequency band of emitted signal, either directly on the temporals received signals or after an adapted filtering. We show on the experimental data the obtained results by the two methods. The temporal frequency-angular sight representation exhibits some typical propagation freaks that we suggest to interpretate.

1 - Introduction

L'identification en retard, en amplitude et en site des différents trajets de propagation en acoustique sous-marine est un objectif important en sonar actif. En effet, la connaissance de ces paramètres, ainsi que leurs évolutions permet de mieux cerner l'origine de phénomènes propres à la propagation dans le milieu, tels que l'effet de surface, la contribution du fond par exemple, ou encore de connaître les positions respectives de l'émetteur et du ou des récepteurs, ainsi que leurs déplacements relatifs.

Afin d'identifier les trajets multiples en retard, l'utilisation d'émissions récurrentes de signaux de type large bande présente un intérêt incontestable[1]. D'autre part, pour discriminer les trajets en site, il est nécessaire d'utiliser à la réception une antenne verticale constituée de plusieurs capteurs (ou centres de phase)[2].

Ces dernières années, des modèles de propagation de type tracés de rayons ont été développés[3]. Ils permettent d'estimer le nombre, le retard, l'amplitude et le site des différents rayons à partir d'un profil de célérité et des conditions expérimentales (immersion de l'émetteurs, des récepteurs, profondeur d'eau...).

La confrontation des résultats obtenus par traitement des signaux expérimentaux avec les estimations proposées par ces modèles, s'impose pour accéder à leurs performances. C'est ce que l'on propose de faire dans cette étude. Trois étapes successives sont alors abordées:

- la mesure des retards et des amplitudes des différents trajets, basée sur l'intercorrélation, signal émis-signal reçu,
- l'analyse spatiale des signaux reçus sur l'antenne de réception mettant en évidence les sites des rayons propres reçus,
- l'identification conjointe des trajets en retards et en site.

La comparaison des résultats trouvés avec ceux estimés par les modèles de tracés de rayons s'avère intéressante afin de tester la validité de ces modèles.

Par ailleurs, le suivi des paramètres au cours du temps peut expliquer la nature de phénomènes importants tels que l'effet de surface, l'effet de pendule de l'antenne, la distorsion distincte des différents fronts d'ondes attachés à chaque fréquence instantanée du signal émis etc...

2 - Contexte expérimental

L'expérimentation, support de cette étude, a été effectuée par le GERDSM en Atlantique par 4300m de fond. Elle met en oeuvre deux bateaux distants de 45 km environ. Le premier bâtiment quasiment en station alimente un émetteur immergé à 30 m. Le second acquiert après filtrage analogique, les signaux reçus sur une antenne verticale constituée de 16 capteurs, immergée à 150 m, comme le montre la figure 1.

Figure 1- Schéma de l'expérimentation

Les capteurs sont distants de 92 cm. L'antenne est en $\lambda/2$ à la fréquence de 823 Hz.

Le signal émis par la source est un signal modulé linéairement en fréquence de bande 700 Hz à 1 kHz de durée 1 seconde, avec une récurrence de 10 s durant 12 minutes ; il est schématisé sur la figure 2.

Figure 2 - Représentation temps-fréquence du signal émis

3 - Analyse temporelle

Le signal reçu sur un capteur est donc constitué de la somme de copies plus ou moins retardées et atténuées du signal émis, correspondant aux différents trajets, à laquelle se superpose le bruit ambiant. De façon classique, on modélise le milieu de transmission entre un émetteur E et un récepteur R par un filtre linéaire F de réponse impulsionnelle $H(\tau)$ auquel se superpose du bruit $b(t)$. Soit le schéma :

En identification active, on dispose de l'émission $e(t)$, (ou de sa copie) et du signal reçu $r(t)$. On voit que le filtre $H(\tau)$ qui minimise l'erreur quadratique en sortie doit satisfaire la relation : $\Gamma_{re}(\tau) = (H * \Gamma_e)(\tau)$

dans laquelle $\Gamma_e(\tau)$ et $\Gamma_{re}(\tau)$ sont les fonctions de corrélation de $e(t)$ et d'intercorrélation de $r(t) / e(t)$.

Si l'on utilise des signaux $e(t)$ large bande, tels que $\Gamma_e(\tau) = \gamma_0 \delta(\tau)$, alors l'intercorrélation $\Gamma_{re}(\tau)$ fournit directement la réponse impulsionnelle $H(t)$ du filtre F.

En application de cette méthode, compte tenu de la nature du signal d'émission et en prenant garde aux problèmes de recouvrement cycliques liés au mode de calcul de l'intercorrélation dûs à l'utilisation de la transformée de Fourier discrète [4], nous obtenons de façon expérimentale la fonction d'intercorrélation schématisée figure 3.

Figure 3 - Intercoorrelation signal émis - signal reçu

En ne considérant que les trajets les plus énergétiques, on peut tracer la fonction $f(t, \tau)$ en juxtaposant les intercorrélations relatives aux principaux trajets reçus tel que cela est présenté sur la figure 4. Il est intéressant de comparer ces résultats avec ceux prévus par le modèle de tracé de rayons classiquement utilisés au GERDSM, voir figure 5.

Figure 4 - Fonction $f(t, \tau)$ des signaux reçus

Figure 5- Prédiction des dates d'arrivée

Nous constatons que le modèle de tracé de rayons pour cette expérimentation prévoit avec beaucoup de certitude les dates d'arrivée respectives des différents rayons. Toutefois, la prédiction des amplitudes est beaucoup moins fiable, la figure 4 montre en effet une variance importante de l'amplitude des trajets sur les 12 minutes de l'expérience.

4 - Analyse spatiale

Nous souhaitons faire une mesure des sites d'arrivée des différents trajets. Remarquons en préliminaire que l'échantillonnage spatial entre les capteurs n'est pas adéquat. La distance d relative au pas entre capteurs est de 96 cm, elle correspond à une antenne en $\lambda/2$ pour $f < 823$ Hz, alors que la fréquence maximale émise est de 1 kHz. Cette anomalie entraîne un repliement spatial que l'on développera ultérieurement. Nous proposons deux types de traitements différents dont les synoptiques sont présentés figure 6.

Figure 6 - Schéma synoptique des traitements

1) Traitements proposés:

Le premier traitement a été effectué par formation de voies monochromatiques sur les fréquences adjacentes de la bande du signal.

Soit $\underline{R}(f)$ le vecteur des signaux reçus en sortie des capteurs, à la fréquence f ,

$\underline{w}^T(f, \theta) = (1, e^{j2\pi f d \sin \theta / c}, \dots, e^{j2\pi f (n-1) d \sin \theta / c})$, le vecteur modèle de propagation.

En sortie de la formation de voies, lorsque l'on vise dans la direction θ , (θ variant de $\theta_{\min}$ à $\theta_{\max}$), pour une fréquence f , on obtient:

$Y(f, \theta) = |\underline{w}^T(f, \theta) \underline{R}(f)|^2$ puis, par moyennage sur toutes les fréquences, on tire :

$$y(\theta) = 1/B \int_B |\underline{w}^T(f, \theta) \underline{R}(f)|^2 df \quad \text{soit en discret :} \quad y(\theta) = 1/M \sum_{i=1}^M Y(f_i, \theta)$$

où les f_i (pour i variant de 1 à M) décrivent la bande B du signal étudié.

Nous pouvons procéder à deux représentations pour chaque traitement:

- $Y(f, \theta)$ que l'on appellera par la suite *surface caractéristique* de la formation de voies.
- $y(\theta)$ que l'on appellera *formation de voies moyennée*.

Le second traitement utilise directement le signal émis. Il est possible de faire la formation de voies, non plus sur le signal reçu, mais sur le signal issu de l'intercorrélation "signal émis-signal reçu" pour chaque capteur, ce qui peut s'écrire en fréquence: $\underline{R}(f) E^*(f)$ où $E(f) = \text{TF}[e(t)]$, $e(t)$ étant le signal émis.

$$\text{On déduit} \quad Y_{\text{cor}}(f, \theta) = |\underline{w}^T(f, \theta) (\underline{R}(f) E^*(f))|^2$$

$$\text{ou encore :} \quad Y_{\text{cor}}(f, \theta) = |\underline{w}^T(f, \theta) \underline{R}(f) E^*(f)|^2$$

On remarque donc, qu'il est équivalent de réaliser un interspectre entre la sortie de la formation de voies vue plus haut, et le signal émis. Nous confirmons que les résultats obtenus par les deux traitements sont analogues. Cependant, pour les signaux traités, $S^*(f)$ est quasiment plat dans la bande 600 - 1000 Hz, il modifie donc peu le spectre en sortie de formation de voies, où il agit comme un filtre passe-bande en sortie de la formation de voies. Dans le cas où $S(f)$ n'aurait pas l'allure d'un passe-bande, les résultats seraient alors notablement améliorés dans ce deuxième cas.

Figures 7 et 8, nous donnons les deux représentations des traitements possibles.

Figure 7 - Formation de voies moyennée

Figure 8 - Fonction caractéristique

2) Interprétation des résultats obtenus:

Sur la figure 7, en considérant la formation de voies moyennées au moment de l'analyse, nous mettons en évidence des maximums pour les sites -28, -7, 12, 34 degrés. Cependant, si l'on effectue cette analyse tout au long de l'expérimentation, nous constatons un décalage angulaire entre les différentes courbes obtenues. Ce décalage peut atteindre 6 degrés en 10 minutes comme le montre la figure 9. Il s'agit là certainement du balancement de l'antenne dans l'hypothèse où l'émetteur est fixe.

Par contre les écarts relatifs angulaires obtenus sont de l'ordre de grandeur de ceux prévus par le logiciel de tracé de rayons qui étaient de -21, -11, 11, 21 degrés. Rappelons que la résolution angulaire de l'antenne utilisée est de 20 degrés environ.

Figure 9 - Formation de voies moyennée à plusieurs instants lors de l'expérimentation

Interprétation des surfaces caractéristiques : sur une surface caractéristique, une source large bande apparaît comme une "dune" parallèle à l'axe des fréquences temporelles. Le tracé des surfaces caractéristiques issues de bruit seul fait apparaître des dunes d'amplitude relativement faibles parallèles à l'axe des fréquences temporelles. Il est vraisemblable que le bâtiment hydrographique situé près de l'antenne réceptrice soit à l'origine de ce phénomène. En effet compte tenu des dimensions de l'antenne de son immersion et de son éloignement par rapport au bateau porteur, celui-ci est vu par l'antenne sous l'incidence de 20 degrés environ.

Dans le cas du calcul des surfaces caractéristiques du signal reçu (les différents trajets sont présents), les dunes visibles se distordent, et il n'y a pas d'alignement net. Nous avons émis l'hypothèse, qu'il fallait en chercher la cause dans une distorsion des plans d'onde attachés à chaque fréquence instantanée du signal large bande, distorsion qui n'est pas la même pour chaque fréquence.

Cette distorsion pourrait être due à des effets de fond ou de rugosité de surface lors des réflexions multiples. De plus, il apparaît pour les incidences éloignées de l'incidence nulle un phénomène de repliement spatial, dû au sous échantillonnage spatial. Nous le développons dans le chapitre suivant, il est caractérisé par la présence de dunes présentant un biais par rapport à l'axe des fréquences temporelles.

L'utilisation d'un signal large bande permet justement de s'affranchir de cette distorsion de plans d'onde dans une analyse spatiale, à condition de procéder à un moyennage fréquentiel sur la bande du signal en sortie de formation de voies.

3) Repliement spatial:

Nous schématisons sur la figure 10, l'effet du repliement spatial. L'axe des abscisses représente les fréquences spatiales, l'axe des ordonnées les fréquences temporelles.

Figure 10 - Représentation espace-fréquence mettant en évidence le repliement spatial

La fréquence spatiale est définie par $u = f \sin \theta / c$. De façon analogue à un traitement temporel, il faut considérer que tout point placé à l'extérieur de $u = u_0/2 = 1/2d$ va se replier à l'intérieur de l'intervalle $(-1/2d; +1/2d)$.

Mais, à la différence d'une fréquence temporelle de signal physique causal, une fréquence spatiale n'est pas symétrique par rapport au zéro.

Un point d'abscisse $u > u_0/2 = 1/2d$ se repliera donc dans le quadrant des fréquences spatiales négatives comme cela est visible sur la figure 10. (Alors qu'une fréquence temporelle se serait repliée aussi dans le quadrant positif).

Par exemple, la droite image de la source à $+90^\circ$ coupe l'axe $u = u_0/2$ pour $f = 823$ Hz, et elle se replie dans le demi-plan des fréquences spatiales négatives.

Il faut tenir compte en outre de l'épanouissement autour de cette droite, causé par la fenêtre appliquée spatialement à l'antenne. Sur la figure 10, l'épanouissement est représenté par des pointillés qui caractérisent les deux premiers zéros encadrant le lobe principal, les fréquences spatiales associées à ces deux premiers zéros sont données par :

$$u = f/c + 1/L \quad \text{et} \quad u = f/c - 1/L \quad \text{où } L \text{ est la longueur de l'antenne.}$$

En effet, l'expression analytique de la surface caractéristique d'une formation de voies, lorsque l'antenne vise la direction θ et en présence d'une source dans la direction θ_0 [1]: $y(f, \theta) = |G(u - u_{\theta_0}) \cdot S(f)|^2$

où G et R sont les transformées de fourier respectivement de la fonction d'apodisation spatiale et du signal reçu, et u_{θ_0} est la fréquence spatiale pour θ_0 . Dans le cas d'une fenêtre naturelle spatiale:

$$G(u) = \sin(\pi u(N-1)d) / [(N-1)\sin(\pi u d)] \quad \text{où } N \text{ est le nombre de capteurs de l'antenne.}$$

$G(u - u_{\theta_0})$ a bien ses deux premiers zéros pour les valeurs de u indiquées plus haut.

Dans le cas de plusieurs sources dans des directions θ_i , cette expression analytique devient:

$$y(f, \theta) = |\sum_i G(u - u_{\theta_i}) \cdot S(f)|^2$$

Nous montrons ce repliement à l'aide de signaux synthétiques, voir figure 11. Pour cette simulation nous avons disposé trois sources de bande fréquentielle 700-1000 Hz aux incidences 0° , 15° , 70° et d'intensité relative 1, 3, 1

Figure 11 - Simulation mettant en évidence le repliement spatial

Des sources éloignées de l'incidence nulle peuvent conduire à un repliement, se caractérisant par l'apparition de sources "fantômes" aux incidences opposées.

Sur la surface caractéristique, ces sources sont repérables, si elles sont isolées. Elles ne sont en effet pas parallèles à l'axe des fréquences temporelles comme on peut le voir sur la figure 11 entre -50 et -90 degrés.

5 - Identification spatio-temporelle des trajets principaux

Jusqu'à présent, nous avons procédé aux deux traitements, temporel et spatial des signaux reçus. Nous avons montré la nécessité de conjuguer un signal large-bande pour le traitement temporel, et un traitement d'antenne pour la mesure de site.

Nous nous proposons ici de faire la liaison entre les deux, de façon à identifier en temps et en site les différents trajets reçus. Pour cela, après avoir "orienté" l'antenne dans une des directions θ_i précédemment trouvées, la sortie de la formation de voies réalise la sommation cohérente des trajets arrivant dans cette direction. Si l'on effectue l'intercorrélation entre la sortie temporelle de la formation de voies (à θ_0) et le signal émis, et que l'on compare cette intercorrélation à celle effectuée sur le signal d'un seul capteur, on observe une modification de la

répartition de l'amplitude des pics. Le pic associé au trajet provenant de la direction θ_0 est particulièrement amplifié, par contre ceux associés à des trajets d'incidence différente sont écrasés. Cela est schématisé sur la figure 12.

Figure 12 - Comparaison des intercorrélations des signaux issus de la sortie d'un capteur de l'antenne et de l'opération sommation cohérente sur l'antenne après formation de voies.

A l'issus de tous ces traitements, l'identification des différents trajets de propagation est possible et l'on peut schématiser les résultats obtenus comme cela est montré ci dessous figure 13. Nous avons comparé les résultats trouvés expérimentalement avec les prédictions fournies par les modèles de tracés de rayons.

Figure 13 - Identification des différents trajets de propagation prédits par le modèle de tracés de rayon et obtenus expérimentalement

Compte tenu de la faible résolution spatiale liée au traitement par formation de voies, l'identification expérimentale est peu précise ; toutefois l'utilisation de méthodes "haute résolution" appliquées aux signaux de type large bande devrait améliorer très nettement cette identification des différents trajets.

6 - Conclusion

Cette étude permet d'abord de valider les modèles de tracé de rayons couramment utilisés. D'une part l'exploitation des signaux large bande conduit à une bonne séparation temporelle des différents trajets de propagation. D'autre part, l'antenne verticale de réception permet par formation de voies de déterminer leurs sites d'arrivée. Pour cela nous utilisons une méthode qui tien compte de toute la bande de fréquence émise. Deux types d'analyse spatiale sont proposés, ils convergent vers des résultats analogues et permettent de faire la liaison entre l'analyse temporelle et l'analyse spatiale. Ils permettent de mettre en évidence plusieurs phénomènes physiques, tels que : l'effet de pendule de l'antenne verticale sur la durée de l'expérimentation, la distorsion des plans d'onde attachés à chaque fréquence instantanée du signal émis, distorsion indépendante d'une fréquence à l'autre, et montrent l'importance du phénomène de repliement lié au sous échantillonnage spatial. L'utilisation d'un signal large bande permet de s'affranchir par moyennage fréquentiel en sortie de formation de voies, du problème de la distorsion de front d'onde.

Nous avons montré également qu'il était possible d'identifier simplement les différents trajets de propagation conjointement en temps et en site.

Remerciements. Cette étude a été réalisée avec le concours de la Direction des Constructions et Armes Navales dans le cadre de la convention CEPHAG/DCN.

Bibliographie

- [1] PALLAS M.A.. Identification active d'un canal de propagation à trajets multiples ; Thèse Cephag 1988
- [2] BANCEL F. Traitement de signaux large-bande reçus sur une antenne verticale. Rapport CEPHAG 39/89.
- [3] JUVE D. Détermination des rayons propres et de la réponse impulsionnelle en océan stratifié. Rapport CEPHAG 10/88.
- [4] KUNT. Traitement numérique des signaux;
- [5] ESCUDIE B. Traitement spatio-temporel en acoustique aérienne ; Imagerie spatiale et fréquentielle des bruiteurs. Grets 1975.
- [6] BURDIC W.S. Underwater acoustic system analysis; Prentice Hall.