



PROPAGATION ACOUSTIQUE EN MILIEU OCEANIQUE ALEATOIRE

Faure B., Goncalves D.

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

RESUME

Nous nous intéressons à l'étude de la propagation des ondes acoustiques en milieu océanique. La réponse impulsionnelle du milieu obtenue sur un récepteur est directement fonction de la nature du milieu que l'on caractérise par le profil de célérité. Toutefois, au cours de la propagation, celui-ci peut évoluer de façon déterministe de l'émetteur jusqu'au récepteur mais également de façon aléatoire. Nous proposons de qualifier, sur la réponse impulsionnelle, l'effet de ces perturbations dans un cas tout à fait réaliste de propagation en atlantique central.

1. Introduction

La détermination de la réponse impulsionnelle du milieu océanique lors de la propagation d'une onde acoustique entre un émetteur et un récepteur immergés, constitue la base de nombreuses applications en Acoustique Sous Marine et notamment en tomographie acoustique océanique. Le problème de son évaluation est en général résolu dans le cas d'un milieu de propagation déterministe. Les calculs de temps d'arrivée des divers trajets sont alors effectués à partir des moyennes des caractéristiques du milieu. Toutefois la nature du milieu océanique est intrinsèquement fluctuante tant du point de vue spatial que temporel. Il n'est d'ailleurs pas possible à partir de mesures réalisées in situ de donner une description exacte du milieu, ce qui conduit à considérer l'intervention de fluctuations aléatoires dans les données. En effet, même si des valeurs moyennes peuvent être définies, la dispersion des données recueillies est inévitable. Elle est principalement due à des phénomènes tels que les variations temporelles de la température, l'influence des courants et les déplacements de masses d'eau telles que les "Meddies" en Atlantique central. Une description plus complète du milieu sous-marin peut donc être obtenue en modélisant les fluctuations des profils de célérité comme étant la combinaison de deux phénomènes : d'une part l'évolution déterministe des valeurs moyennes de célérité tout au long de la propagation et d'autre part l'addition de perturbations aléatoires.

2. Milieu marin hétérogène et fluctuant étudié

L'inhomogénéité du milieu marin se manifeste donc au travers de variations suivant les directions horizontale et verticale. Elle est, de plus, affectée de perturbations dont la période temporelle est très variable. Toutefois, dans le cadre de la propagation d'une onde acoustique entre un émetteur et un récepteur immergés,

ABSTRACT

We consider in this paper the wave propagation in underwater acoustic. The impulse response of medium obtained on an hydrophon is a function of speed profile. But during propagation the medium configuration is not constant and the speed profil could evoluate to deterministic or random fonction. We present here the predicted results on the impulse response when the medium is perturbed as these cases. We consider a realistic case of propagation in central Atlantic near the Azores.

l'océan peut être convenablement modélisé par un milieu bidimensionnel stratifié verticalement.

Une première approche consiste à considérer que les caractéristiques du milieu sous-marin restent "figées" pendant la propagation. Les divers calculs sont alors effectués en utilisant les valeurs moyennes des caractéristiques du milieu (moyennes temporelles). Dans cette optique, l'utilisation de profils moyens de célérité pour caractériser le milieu océanique s'avère particulièrement bien adaptée.

Une seconde étape consiste alors à essayer de modéliser les écarts des paramètres réels par rapport à leur valeur moyenne par l'introduction de paramètres aléatoires. L'ajout de ceux-ci ayant pour finalité d'affiner la modélisation du milieu, ils doivent en particulier répondre à des critères de corrélation qui sont en accord avec les observations effectuées in situ. C'est cette idée qui se trouve à la base du processus de génération des perturbations aléatoires de célérité qui seront introduites dans la suite. Nous présentons sur la figure 1, un exemple de tracés de profils très proches des mesures expérimentales issues de la campagne "PROTEE 93" organisée par la CTSN. Cette campagne avait entre autre pour objectif l'étude de la propagation près de la première zone de convergence. Par la suite, nous considérerons donc des distances de propagation de 60 km.

3. Modèle de propagation utilisé

Nous nous proposons d'utiliser l'approche géométrique pour résoudre l'équation de propagation de Helmholtz :

$$\Delta\Phi + k^2 \Phi = 0$$

où k représente le nombre d'onde, ($k = \frac{\omega}{c}$).



information est très intéressante pour l'analyse des arrivées dans tout le plan de réception.

4-2 . Introduction des différentes fluctuations

Méthodologie générale

Conformément à ce qui a été annoncé précédemment, la méthode employée se propose de considérer l'intervention des fluctuations de célérité comme l'ajout de perturbations aléatoires sur les profils de célérité moyens. L'obtention des réponses impulsionnelles perturbées peut être décomposée en trois étapes principales :

a) élaboration de la matrice des valeurs moyennes de célérité à partir des différents profils connus entre les points d'émission et de réception. Il s'agit donc en fait d'un échantillonnage bidimensionnel du milieu qui inclut au besoin les variations spatiales et déterministes des profils de célérité,

b) construction des matrices de perturbation des profils. L'élément qui sert de base à l'obtention de celles-ci est la fonction d'autocorrélation bidimensionnelle des variations de célérité, l'idée étant ici que les perturbations synthétisées doivent satisfaire aux conditions de corrélation auxquelles répondent les perturbations réelles,

c) calcul des rayons acoustiques sur la base de la matrice de célérité affectée successivement des différentes réalisations de la matrice des perturbations. Ceci permet alors d'obtenir un ensemble de réalisations des réponses impulsionnelles perturbées. La figure 2 résume la démarche adoptée par cette méthode.

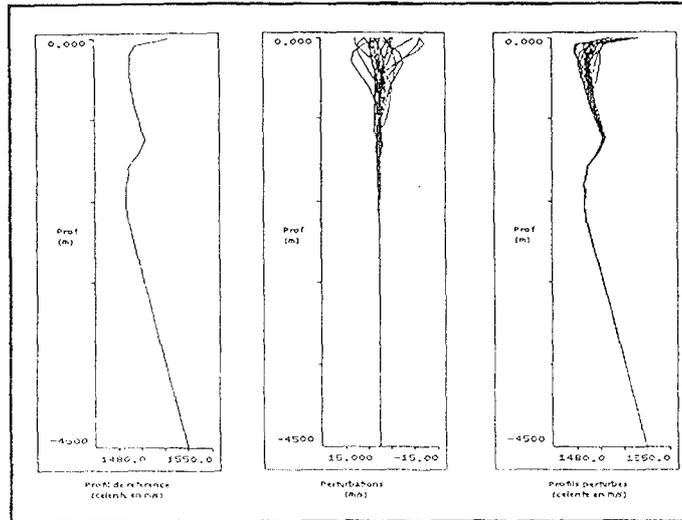


Figure 1 Exemples de profils perturbés dans la zone étudiée

et dans laquelle $\Phi(\vec{r}, t) = \Phi(\vec{r}) e^{-i\omega t}$ peut se mettre sous la forme :

$$\Phi(\vec{r}) = \Phi_0(\vec{r}) e^{i\Phi_1(\vec{r})} \text{ où } \vec{r} = \begin{cases} r \\ \theta \\ z \end{cases} \text{ en coordonnées cylindriques.}$$

Cette approche classique par tracé de rayons présente plusieurs avantages. Tout d'abord, de pouvoir tenir compte de conditions aux limites variées tant du point de vue de la géométrie des interfaces que de leur coefficient de réflexion. De plus, les calculs sont indépendants de la fréquence. Citons également l'interprétation aisée des résultats qu'elle fournit et la relative simplicité des calculs de la réponse impulsionnelle.

4 . Modélisation numérique

4-1 . Hypothèses de travail

En accord avec les domaines de fréquence utilisés expérimentalement, (quelques centaines de Hertz) et avec les conditions géographiques de propagation, les hypothèses faites sont les suivantes :

- l'interface océan/atmosphère est modélisée par un plan parfaitement réfléchissant,
 - le fond est également parfaitement réfléchissant,
 - en tout point du milieu insonifié, la célérité est obtenue par interpolation linéaire des profils de célérité connus,
 - en tout point du milieu insonifié le gradient de célérité horizontal est négligeable devant le gradient de célérité vertical.
- Les codes de calcul ont été réalisés de façon à ce que le profil de célérité puisse se déformer au cours de la propagation. Il peut ainsi évoluer, par exemple, entre un profil imposé à la source et un autre au récepteur. De même, si plusieurs profils sont connus entre la source et le récepteur, ils peuvent être intégrés aux calculs.

Les principaux résultats fournis par le calcul sont : le temps d'arrivée, la profondeur d'arrivée, l'angle d'arrivée sur les capteurs, la géométrie des rayons propres, le taux d'atténuation géométrique des rayons propres trouvés.

Ceci permet notamment de tracer la réponse impulsionnelle du milieu et également de calculer les branches verticales, c'est à dire la profondeur d'arrivée du faisceau de rayons à une distance donnée de l'émetteur, en fonction de l'angle de tir. Cette

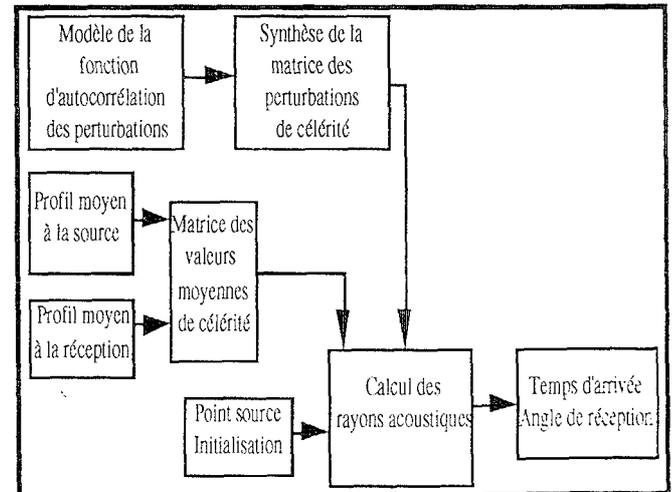


Figure 2 Calcul des réponses impulsionnelles perturbées

Il est à noter que le calcul des rayons s'effectue sur des données perturbées mais figées, comme dans le cas des déformations déterministes des profils. L'algorithme utilisé étant à pas variable, il se sert des matrices de valeurs moyennes et de celle des perturbations (qui sont échantillonnées avec des pas très différents et qui sont donc de tailles très différentes) pour effectuer une interpolation linéaire au point courant du rayon acoustique calculé. De ce fait la célérité reste une variable continue en tout point du milieu insonifié.

Modélisation des perturbations aléatoires

La donnée qui sert de base à la génération des perturbations de célérité est la fonction d'autocorrélation de celles-ci. Il existe plusieurs expressions mathématiques qui modélisent de façon réaliste les variations effectivement observées en pratique. Toutefois, parmi ces dernières nous avons choisi la fonction

d'autocorrélation gaussienne. En fonction des variables $(r-r')$ et $(z-z')$, elle est définie par :

$$\Gamma(r-r', z-z') = \Gamma_0 \exp\left(\frac{-(r-r')^2}{2 L_h^2}\right) \exp\left(\frac{-(z-z')^2}{2 L_v^2}\right)$$

L_h et L_v représentent les longueurs de corrélation horizontale et verticale des fluctuations de célérité. Notons qu'elles peuvent varier respectivement de 500 m à 50 km et de 10 m à 1 km. Elles sont les deux paramètres importants de la modélisation.

Le spectre correspondant à cette fonction d'autocorrélation est également gaussien. Il peut s'écrire sous la forme :

$$\gamma(h, v) = \gamma_0 L_h L_v \exp\left(-2 \pi^2 L_h^2 h^2\right) \exp\left(-2 \pi^2 L_v^2 v^2\right)$$

Où h et v représentent les fréquences spatiales horizontale et verticale. Il s'agit donc de construire un processus aléatoire $\delta c(r, z)$ ayant un spectre $S(h, v)$ identique à $\gamma(h, v)$. Pour cela, à partir d'un processus aléatoire B gaussien, centré, réduit, la grandeur $\Psi(h, v)$ est construite comme suit :

$$\Psi(h, v) = B \sqrt{\gamma(h, v)} \quad (\text{avec } E[B] = 0 \text{ et } E[B^2] = 1)$$

Où $E[\]$ représente l'espérance mathématique. La perturbation $\delta c(r, z)$ est obtenue par transformée de Fourier inverse de $\Psi(h, v)$:

$$\delta c(r, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(h, v) \exp(2i\pi(hv + rz)) dh dv$$

Par construction le spectre de $\delta c(r, z)$ est donné par :

$$S(h, v) = E[|\Psi(h, v)|^2] = E[B^2 \gamma(h, v)] = \gamma(h, v)$$

Le processus aléatoire ainsi synthétisé a donc bien le spectre attendu. La figure 3 représente une réalisation de ce processus. Elle a été obtenue pour $L_h=2000$ m, $L_v=100$ m. La signification physique des longueurs de corrélation est illustrée dans cette figure par l'étendue des taches de grisé.

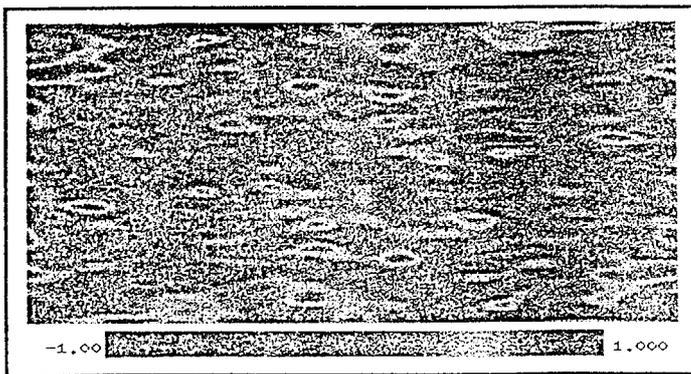


Figure 3 Un exemple de réalisation des perturbations $\delta c(r, z)$

L'amplitude des variations de célérité étant fonction de l'immersion, il est nécessaire de moduler ensuite le processus aléatoire $\delta c(r, z)$ par une fonction représentant l'enveloppe des perturbations.

5. Influence des perturbations du profil de célérité sur la réponse impulsionnelle

5-1. Analyse des perturbations déterministes

Compte tenu de la structure complexe du profil de célérité dans la zone étudiée, il n'était pas possible de qualifier globalement

l'effet des déformations lentes de celui-ci sur la réponse impulsionnelle obtenue à la réception. Nous avons donc décomposé le profil total en quatre zones distinctes et en fonction des conditions géométriques de propagation, nous avons dans le plan de réception constaté l'effet des variations sur la réponse impulsionnelle. Les zones significatives du profil moyen sont : le gradient de surface, le chenal de propagation supérieur, le chenal de propagation inférieur et la zone intermédiaire. Afin de bien mettre en évidence l'influence propre des contributions de chaque portion de profil sur la réponse obtenue dans le plan de réception, en fonction de la profondeur de l'émetteur, nous avons développé un moyen de visualisation global tridimensionnel permettant en fonction de la profondeur de l'émetteur, de connaître les profondeurs d'arrivées des différents rayons. Grâce à cet outil et en comparant les résultats avant et après modification du profil, nous pouvons tirer les conclusions suivantes : une modification du profil à la hauteur du chenal sonore inférieur, n'a que peu d'effet aussi bien sur les temps d'arrivée que sur les profondeurs d'arrivées. Pour les variations à la hauteur du chenal supérieur, les conclusions sont quasiment similaires. Par contre une modification de la zone intermédiaire va affecter toutes les profondeurs à la réception et cet effet est d'autant plus sensible qu'il touche les rayons en limite de guidage dans le SOFAR. La modification du gradient surfacique est elle aussi prépondérante et d'autant plus importante que l'angle d'incidence de départ est grand.

En conclusion, nous avons montré qu'il est possible de déterminer les zones "géographiques" d'influence des perturbations dues aux modifications des profils. Il apparaît de plus que les zones de modifications des profils et les zones de perturbations qui en résultent sont intimement liées, ce qui en soit est déjà une information intéressante. En repérant une configuration de propagation donnée sur des graphes tridimensionnels, il est alors possible de déterminer de quel ordre vont être les perturbations subies par la réponse impulsionnelle, même si dans certains cas une étude angulaire plus poussée est nécessaire.

5-2 Analyse des perturbations aléatoires du profil de célérité

Il s'agit ici d'essayer de caractériser la dépendance des variations de la réponse impulsionnelle du milieu vis à vis des paramètres caractéristiques des perturbations aléatoires introduites. L'influence de la distance de propagation, de l'amplitude des perturbations, de la zone du profil perturbée et des longueurs de corrélation horizontale et verticale a ainsi été étudiée.

Les données de base utilisées sont les mêmes que celles employées pendant la première partie de l'étude concernant les déformations déterministes des profils. La réponse impulsionnelle de référence a été obtenue pour une source immergée à -150 m et une série de cinq capteurs étagés verticalement de -200 m à -1000 m situés à 60 km du point d'émission. Pour la référence, la célérité du milieu modélisé n'a pas été affectée par les perturbations aléatoires.

Vingt et une configurations de propagation ont ensuite été étudiées. Pour celles-ci la source est toujours immergée à -150 m, les cinq récepteurs étant situés entre -200 m et -1000 m comme dans le cas de la référence. Cependant les profils sont cette fois perturbés.

Pour chaque configuration perturbée, 50 réalisations de la matrice des perturbations de célérité ont été synthétisées, puis le calcul des rayons propres de la réponse impulsionnelle a été effectué pour chacune d'elles. Ceci permet d'obtenir un ensemble de 50 réalisations de la réponse impulsionnelle perturbée par configuration.

Notons qu'une modification de l'enveloppe des perturbations en surface a principalement pour conséquence la dispersion des temps d'arrivée du groupe de rayons uniquement guidés par le



premier chenal sonore. Au contraire une variation de l'enveloppe au niveau de la zone intermédiaire affecte tous les trajets présents dans la réponse impulsionnelle, même si son action sur les rayons uniquement guidés par le premier chenal sonore reste plus limitée que pour une perturbation en surface.

L'influence de la zone de perturbation dépend donc essentiellement du parcours des rayons présents dans la réponse impulsionnelle. Les dépendances entre domaine de perturbation du profil et zone d'influence de la réponse impulsionnelle étant en fait de même nature que celles mises en évidence au cours de l'étude des déformations déterministes du profil.

Influence des longueurs de corrélation horizontale et verticale des perturbations

Au vu des résultats obtenus pour les diverses configurations de propagation, nous avons constaté que les longueurs de corrélation horizontale et verticale ont des influences différentes. En ce qui concerne la longueur de corrélation horizontale, ces variations entraînent des modifications notables à la fois sur les rayons guidés uniquement par le premier chenal sonore et ceux guidés par les deux chenaux. Il apparaît de plus qu'elle n'a que très peu d'influence sur les valeurs moyennes des arrivées. Par contre il ressort de manière assez nette que la dispersion des temps de parcours des rayons augmente quand la valeur de la longueur de corrélation horizontale devient plus importante.

De même, les modifications de la longueur de corrélation verticale engendrent des différences négligeables sur les valeurs moyennes des temps d'arrivée. Son influence semble plus spécialement marquée pour les rayons qui sont à la fois guidés par le premier et le deuxième chenal sonore, c'est à dire ceux qui présentent une plage de variation plus grande du point de vue de l'immersion atteinte pendant leur parcours. Le lien existant entre la dispersion des arrivées et l'évolution de la longueur de corrélation verticale est cependant plus flou que celui mis en évidence pour la longueur de corrélation horizontale.

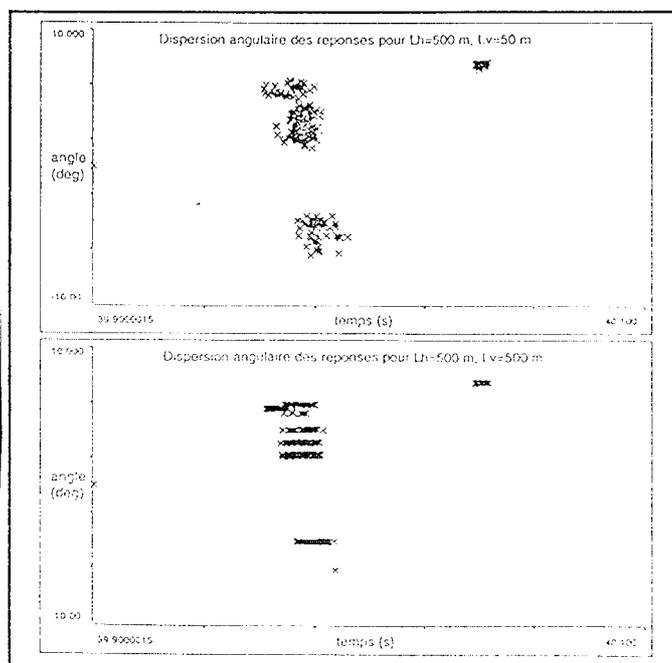


Figure 4 Dispersion angulaire des rayons en fonction de la longueur de corrélation verticale

Toutefois, si le tracé de la dispersion des réponses impulsionnelles est effectué en prenant pour abscisse le temps de parcours et pour ordonnée l'angle d'incidence à la réception, il est possible de mettre en valeur ce qui pourrait être appelé la dispersion angulaire des rayons. Il est alors manifeste que les

variations de la longueur de corrélation verticale jouent un rôle important vis à vis de celle-ci. Ainsi quand la longueur de corrélation verticale augmente la dispersion angulaire des rayons tend à diminuer fortement. Un exemple d'illustration en est donné par la figure 4.

6. Conclusion

Cette étude a permis de qualifier les modifications de la réponse impulsionnelle dues à des perturbations du profil de célérité lors d'une propagation ASM. Nous avons modélisé deux sortes de perturbations : le premier type de déformation est essentiellement lié aux variations déterministes du profil de célérité durant la propagation. Nous avons montré que dans la région prospectée (au large des Açores), la portion du profil de célérité affectée par de telles perturbations n'entraînait pas les mêmes conséquences sur la réponse impulsionnelle. La mise en forme nouvelle des résultats fournis par le calcul des rayons acoustiques qui a été développée au cours de cette partie de l'étude semble être un outil relativement bien adapté à la caractérisation de ce type de déformations. Il est ainsi possible de cerner les régions "géographiques" d'influence du profil de célérité et de prévoir de quel ordre vont être les perturbations engendrées sur la réponse impulsionnelle.

Le deuxième type de variations correspond à l'introduction de variations aléatoires des profils de célérité autour de leur valeur moyenne. Il apparaît ainsi que les longueurs de corrélation horizontale et verticale des perturbations introduites sont deux éléments caractéristiques des fluctuations observées sur la réponse impulsionnelle. La longueur de corrélation horizontale joue un rôle prédominant au niveau de la dispersion temporelle des arrivées, la longueur de corrélation verticale influant principalement sur la dispersion angulaire des rayons. D'autres paramètres, tels que la zone de modification du profil et l'amplitude des perturbations introduites, ont quant à eux une influence qui ressemble par sa nature à celle observée lors de modifications déterministes des profils.

Il est également à noter que la prise en compte de l'ensemble de ces déformations (évolution déterministe des valeurs moyennes de célérité et perturbations aléatoires additives) permet d'effectuer des simulations assez réalistes de la propagation des ondes acoustiques dans l'océan (au moins en ce qui concerne les propagations sur de longues distances). La dernière version du programme développé permet en outre de prendre comme élément de base pour la génération des perturbations aléatoires, non plus une fonction d'autocorrélation synthétique, mais un spectre déduit des observations in situ. Ceci autoriserait par exemple une confrontation des résultats obtenus avec des données expérimentales.

BIBLIOGRAPHIE

- BUCKINGHAM M. J : Ocean acoustic models, Journal acoustique, juin 1992.
- BURDIC W : Underwater acoustic system analysis, Prentice Hall, 1984.
- FLATTE S M : Sound transmission through a fluctuating ocean. Cambridge University Press, 1979.
- MAUURY D : Détection, estimation et identification pour la tomographie acoustique océanique. Etude théorique et expérimentale, thèse de doctorat INPG, mars 1994.
- MUNK W H, ZACHARIASEN F : Sound propagation through a fluctuating stratified ocean. Theory and observation. JASA 59(4), avril 1974.
- SPIESBERGER J L, WORCESTER P F : Perturbations in travel time and ray geometry due to mesoscale disturbances. A comparison of exact and approximate calculations. JASA 74(1), juillet 1983.