

ESTIMATION TEMPORELLE D'ARRIVEES ACOUSTIQUES DANS LES ENREGISTREMENTS DE TOMOGRAPHIE ACOUSTIQUE DE LA CAMPAGNE GASTOM 90

Y. STEPHAN & F.R. MARTIN-LAUZER

Centre Militaire d'Océanographie
13, rue du Chatellier, BP 426
29275 BREST CEDEX

RESUME

La Tomographie Acoustique Océanique a pour but l'estimation des champs tridimensionnels des paramètres acoustico-océaniques à partir des mesures de propagation. Un des problèmes majeurs est la détection et l'estimation des arrivées, en particulier lorsqu'elles sont mal résolues. Cet article présente la méthode d'extraction d'informations temporelles dans les enregistrements acoustiques de la campagne GASTOM 90. Il montre que l'on peut s'affranchir de la non-séparation des arrivées en identifiant dans le signal des fronts caractéristiques correspondant à des groupes de rayons de même nature. En associant à chaque front un rayon donné par les simulations, on peut alors estimer par inversion le champ de célérité sur la zone insonifiée.

1. INTRODUCTION

La Tomographie Acoustique Océanique (TAO) est un concept né dans les années 70 des travaux de K. Wunsch et W. Munk¹. La première concrétisation et la première validation de ce concept ont été réalisées dès 1981 par la campagne américaine OAT81². La TAO est une méthode d'observation de l'océan à partir des mesures de la propagation acoustique. Son principe est clairement établi : il s'agit d'estimer les temps de parcours d'un signal acoustique sur des distances données et d'en déduire le champ de célérité correspondant. L'avantage de la TAO est qu'elle permet de disposer d'estimations tridimensionnelles des paramètres caractéristiques du milieu (célérité, température, densité, ...) sur de grandes distances avec une cadence de mesure élevée, tout en gardant un bon compromis entre les résolutions spatiale et temporelle.

Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) a organisé en 1990 la campagne GASTOM (GAScogne TOMographie) dont l'objectif était de valider l'utilisation de la tomographie acoustique en Atlantique Nord-Est (ANE). Les conditions de propagation dans cette région sont caractérisées par un dédoublement du chenal de propagation dû aux intrusions d'eaux méditerranéennes à une profondeur d'environ 1000 mètres. Le chenal supérieur, dans lequel étaient placés les instruments, concentre les arrivées tant sur le plan temporel que sur le plan angulaire. Les arrivées de chaque rayon ne sont pas séparables et le concept classi-

ABSTRACT

The purpose of Ocean Acoustic Tomography is to estimate the acoustical and oceanographical parameters fields using acoustic data issued from propagation measurements. One among the problems stems from signal detection and time-delay estimation, especially when rays arrivals are badly resolved. This paper presents a method for feature extraction in the acoustical recordings of the GASTOM 90 tomography experiment. It is shown that the bad resolution on the arrivals can be overcome by detecting and estimating steady fronts in the signal. These fronts are related to groups of rays which have some common features. By associating each front to a ray issued from acoustical simulations, the inversions can be performed and the sound-velocity field in the area can be retrieved.

que de la tomographie (comparaison des mesures et des simulations pour chaque rayon) n'est pas applicable.

Le but de cette communication est de montrer comment il est possible de s'affranchir du problème de non-séparabilité des arrivées. Dans une première partie, la campagne GASTOM est brièvement décrite et une analyse des données est menée. La deuxième partie est consacrée à la méthode d'extraction de fronts caractéristiques dans le signal. Trois fronts sont identifiés et extraits par seuillage et filtrage adapté. Le lien est fait entre les paramètres temporels de chaque front et les rayons qui leur correspondent dans les simulations, permettant alors l'utilisation des techniques usuelles d'inversions en tomographie.

2. LA CAMPAGNE GASTOM

Le SHOM, en collaboration avec l'IFREMER, a organisé la campagne GASTOM 90 entre mai et octobre 1990 sur la plaine abyssale dans le Golfe de Gascogne³. Un réseau de six émetteurs récepteurs a été déployé (figure 1). Le réseau est pentagonal avec un instrument central afin d'augmenter la résolution spatiale : centre de la zone. Les instruments sont mouillés à 400 mètres d'immersion et positionnés par triangulation sur un champ de balises acoustiques posées sur le fond. Le signal acoustique émis est un



séquence binaire, de longueur maximale (SLBM) qui module en phase une onde porteuse sinusoïdale (fréquence : 400 Hz, période de la séquence modulante : 5.11 s). La réception est assurée par un réseau d'hydrophones. Le signal est traité in-situ suivant les techniques usuelles en tomographie⁴ : démodulation, sommation cohérente et filtrage adapté.

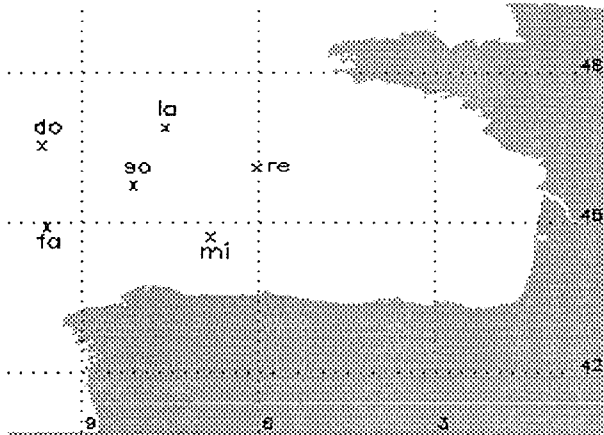


figure 1 : position des instruments (repérés par des notes) lors de la campagne GASTOM 90 (immersion : 400 mètres). Les distances de propagation entre les instruments (15 paires au total) varient entre 135 et 310 km.

Les conditions de propagation en proche ANE sont caractérisées par un dédoublement du canal sonore dû aux intrusions d'eaux méditerranéennes remontant du détroit de Gibraltar. Ces eaux plus salines induisent un maximum profond de célérité à 1000 mètres (figure 2). Dans cette configuration de bathycélérimétrie, on peut définir quatre régimes de propagation⁵ (au sens de la théorie des rayons). Les rais RR^+ sont les rayons guidés par le canal supérieur (réfractions pures). Les rais RR^- sont guidés par le canal principal et correspondent aux zones bien connues de convergence. Les rais SR sont réfléchis en surface et réfractés en couche profonde. Enfin, les rayons SB sont réfléchis

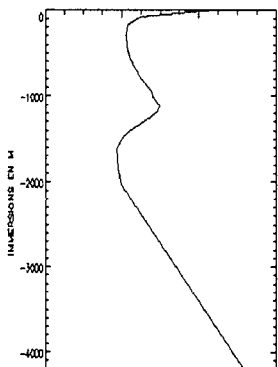


figure 2 : profil de célérité en proche atlantique nord-est..

SB, fortement atténués, ne sont visibles que sur quelques enregistrements correspondant aux distances les plus courtes. Dans cette étude, nous ne cherchons à exploiter que le premier paquet d'énergie

correspondant à la propagation guidée dans le canal supérieur. Le problème se pose en ces termes : comment, devant l'impossibilité d'isoler et d'identifier les rayons propres dans les enregistrements acoustiques, extraire de l'information « utile » (c'est-à-dire inversible) ?

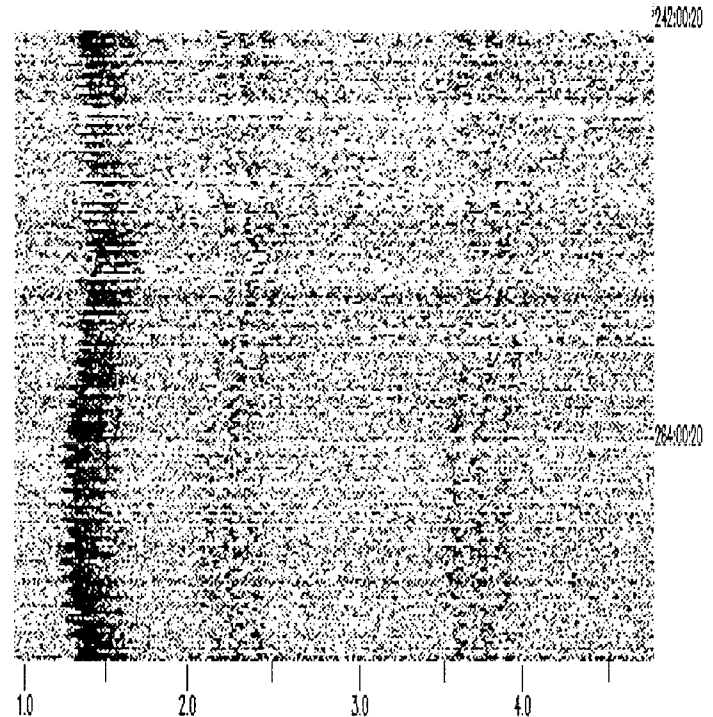


figure 3 : exemple d'enregistrement acoustique pour la paire DOSO (distance 149 km). L'axe des X représente le temps de propagation (dans une fenêtre d'écoute de 5.11 s). L'axe des Y désigne les émissions successives (une émission toutes les deux heures entre les jours juliens 242 et 270). L'intensité du pixel représente l'énergie reçue. Le premier paquet d'énergie comprend les rayons guidés par le canal supérieur. Les arrivées tardives (triplets) sont les rayons SB.

3. IDENTIFICATION ET DETECTION DE FRONTS

Dans cette étude, seuls les rayons guidés dans le canal supérieur nous intéressent. Ils échantillonnent la colonne d'eau depuis la thermocline saisonnière (~ 80 mètres) jusqu'à l'eau méditerranéenne supérieure (EMS) en passant par l'eau centrale nord-atlantique (ECNA). Ainsi qu'on l'a vu, il est impossible de séparer les arrivées des ces rayons. Nous proposons dans cette partie d'interpréter les arrivées en terme de caractéristiques sur le signal reçu. On ne cherche plus à identifier et estimer des arrivées individuelles mais à extraire du paquet d'énergie des informations concernant des groupes de rayons de même nature.

3.1 Identification des fronts

La forme générale du signal reçu présente trois caractéristiques (figure 4). La première est un fort gradient qui traduit l'arrivée de l'énergie. La seconde caractéristique est donnée par les arrivées les plus énergétiques (pic principal du signal). La troisième caractéristique est la « symétrique » de la première, c'est-à-dire un gradient négatif traduisant la disparition du signal. Dans la suite, nous désignons par « fronts » l'évolution de chacune des trois caractéristiques

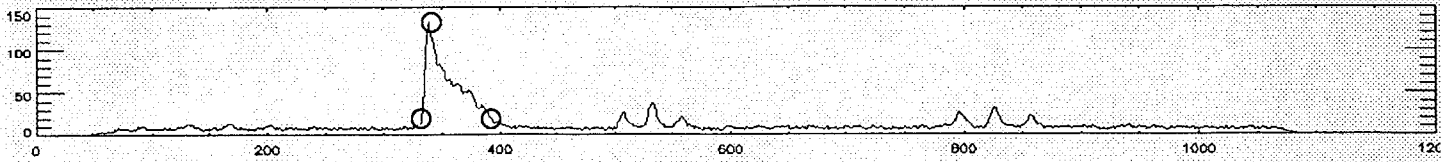


figure 4 : moyenne des émissions successives pour la paire DOSO. Le paquet d'énergie guidé dans le chenal supérieur présente trois caractéristiques (repérées par un cercle) : arrivée du signal, pic principal et fin du signal.

en fonction du temps de campagne, c'est-à-dire en fonction des émissions successives. Le front 1 désigne ainsi l'évolution de l'arrivée du signal, le front 2 celle du pic principal et le front 3 celle de la traine.

3.2 extraction des fronts

La seconde étape consiste à estimer le temps d'arrivée de chaque front. On peut distinguer sur les enregistrements deux types de variations. Les effets des processus océaniques de moyenne échelle (méso-échelle) se traduisent par des modifications «lentes» des temps d'arrivée de chaque front. Ces variations sont dues à des phénomènes océaniques tels que les tourbillons, les fronts, ... Sur la méso-échelle se superpose un régime de variations rapides dont l'origine est la marée et dont l'influence sur le temps d'arrivée du signal est direct (perturbation de la célérité du milieu) ou indirecte (déplacement des lignes de mouillage). Bien que l'intérêt océanographique de la tomographie porte essentiellement sur la méso-échelle, il est très intéressant de pouvoir extraire le maximum d'informations afin de couvrir le spectre d'observation le plus large possible. La difficulté principale dans l'estimation des fronts réside dans les fluctuations du rapport Signal/Bruit d'une émission à une autre. Il existe dans la littérature de nombreuses techniques de prédictions et d'estimations appliquées aux traitements des signaux en tomographie ^{6, 7}. Il n'existe cependant pas de méthodes universelles et les données acoustiques recueillies à chaque campagne nécessitent un traitement adapté à leurs caractéristiques (rapport S/B, résolution instrumentale, ...). Pour les données de la campagne GASTOM, nous avons choisi d'utiliser des méthodes simples de détection (seuillage, filtrage adapté) en augmentant leur robustesse par de la connaissance *a priori*.

3.2.1 Numérisation

Dans un premier temps, les fronts sont numérisés par visualisation sur console graphique. Le résultat de cette numérisation fournit ainsi une estimation grossière des variations à méso-échelle des trois fronts. En pratique, les enregistrements sont numérisés sur une soixantaine de points (pour une longueur totale d'émission de 1000 échantillons), ce qui correspond à un point tous les trois jours de campagne. Les traces complètes numérisées sont obtenues par interpolation linéaire.

3.2.2 Fenêtre de détection

Notre interprétation du signal portant sur des caractéristiques bien marquées dans le signal, la principale difficulté se situe dans les fluctuations du rapport S/B. Dans le cas de réceptions très bruitées, les méthodes de détection-estimation sont souvent mises en échec. Le rôle des fenêtres est d'augmenter la robustesse. Pour chaque front, on définit une fenêtre temporelle centrée sur la numérisation. Les caractéristiques du signal sont systématiquement recherchées dans cette fenêtre, qui est interprétée en terme de con-

naissance *a priori*.

3.2.3 Détection, Estimation

Deux types de détection sont appliqués. Les fronts 1 et 3 sont détectés par seuillage et le front 2 par intercorrélacion avec un signal moyen (moyenne des lignes des enregistrements).

Désignons par F_j la fenêtre de détection ramenée en nombre de pixels (1 pixel = 5 ms) pour l'émission j . Soit A_j le niveau de bruit (donné par le système de contrôle automatique du gain) ramené en niveau de gris. Le seuillage est effectué par recherche d'une séquence de N_f pixels consécutifs dont l'intensité est supérieure à A_j . Le premier (respectivement le dernier) pixel de la séquence est pris pour donner le temps d'arrivée du front 1 (respectivement du front 3).

Le front 2 est détecté par intercorrélacion de la réception j avec une réplique du signal reçu calculée par recalage et moyennage des meilleures réceptions. Le pic de corrélation retenu est celui correspondant à la détection du maximum dans la fenêtre F_j .

L'algorithme de détection pour chaque enregistrement est donc le suivant :

- A. numérisation $\Rightarrow (\hat{t}_j^k)$
 $k=1,2,3$
 $j=1,...,NBE$

où NBE désigne le nombre d'émissions (nombre de lignes) de l'enregistrement et t le temps estimé en nombre de pixels.

- B. fenêtres $\Rightarrow (F_j^k)$
 $k=1,2,3$
 $j=1,...,NBE$

- C. détection-estimation

C.1 front 1 et 3

On calcule : $N_f - 1$

$$S_{N_f}(t) = \prod_{k=0}^{N_f-1} \frac{1}{2} \left(\frac{|A_{i+k} - A_j|}{A_{i+k} - A_j} + 1 \right) \quad \text{pour}$$

$$t \in \left[\hat{t}_j^k - F_j^k/2, \hat{t}_j^k + F_j^k/2 \right]$$

Les valeurs retenues sont :

$$\hat{t}_j^1 = \min (t \in F_j^1 / S_{N_f}(t) = 1)$$

$$\hat{t}_j^3 = \max (t \in F_j^3 / S_{N_f}(t) = 1)$$

C.2 front 2

On calcule :

$$r(t) = \frac{1}{NBE} \sum_j s_j(t) = \langle S(t) \rangle$$

$$\Gamma_{r, s_j} = \text{intercor}(s_j(t), r(t))$$



La valeur retenue est le maximum d'intercorrélation contenu dans la fenêtre de détection.

Un exemple de résultats pour les trois fronts de la paire DOSO est donné en figure 5. L'algorithme de détection-estimation permet de retrouver les deux régimes de fluctuations (mésos-échelle, marée).

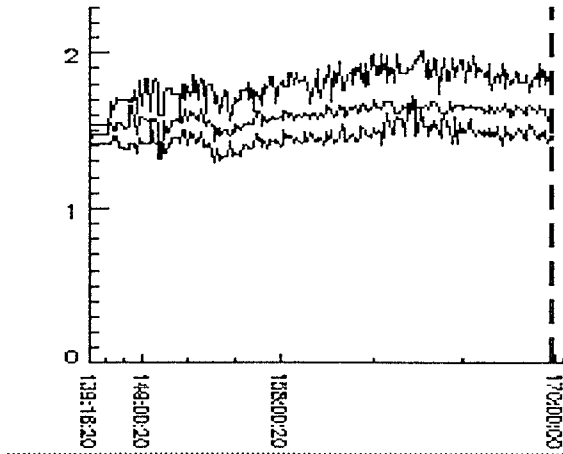


Figure 5 : résultats des détections-estimations des trois fronts pour la paire DOSO (en ordonnée : temps en seconde, en abscisse : jours de la campagne).

3.3 Interprétation

Afin d'obtenir de l'information inversible, il est nécessaire de relier les paramètres du signal aux rayons obtenus à partir des simulations. Ainsi qu'on l'a vu, l'identification individuelle des rayons est impossible. On se propose ici de mettre en relation les fronts extraits du signal avec des groupes de rayons de caractéristiques emblables. La définition même des fronts fournit ces caractéristiques. En effet, le front 1 (respectivement le front 3) représente l'arrivée de l'énergie qui s'est propagée avec la plus grande vitesse de groupe (respectivement la plus faible). On extrait des simulations le profil de référence donné en figure 2) les rayons propres ayant les temps d'arrivée les plus faibles (respectivement les plus élevés). Aux fronts 1 et 3 correspondent ainsi un groupe de rayons de mêmes caractéristiques temporelles. Les simulations montrent que les rayons ont un temps d'arrivée qui croît avec leur amplitude de réfraction⁸ (écart entre les retournements haut et bas). On peut donc associer à chaque groupe un rayon fictif «moyen» de temps d'arrivée égal au temps de groupe du paquet. Les fronts 1 et 3 sont ainsi associés à un rayon. De la même façon, les rayons d'amplitude maximale sont associés au front 2. Nous avons choisi comme critère d'amplitude le facteur focal⁸ (qui traduit les pertes géométriques). Afin de vérifier que la non-validité de l'acoustique géométrique au voisinage des caustiques ne perturbait pas l'amplitude relative des rayons, un calcul de propagation par la théorie des modes normaux a été réalisé. Il a montré que l'arrivée du maximum d'énergie correspondait à la propagation des modes de vitesse de phase intermédiaire (dans l'approximation de WKB, ils correspondent à un système de rayons de vitesses de phase comprises entre celles des fronts 1 et 3). Le front 2 est alors associé à un rayon moyen d'amplitude maximale.

Cette interprétation du signal acoustique permet de disposer

de trois informations temporelles identifiables. Le principe classique de la TAO peut alors être utilisé afin d'inverser les différences de temps d'arrivée entre les fronts et les rayons associés⁸.

3.4 Limites. Perspectives.

L'interprétation proposée du signal acoustique a permis de s'affranchir de la non-séparabilité des arrivées. Cependant, elle présente plusieurs inconvénients. D'une part, le nombre de caractéristiques exploitables est réduit et ne permet pas une bonne résolution verticale (mauvais échantillonnage de la colonne d'eau). D'autre part, l'approche utilisée ici, bien qu'inspirée des méthodes d'estimation bayésienne puisque reposant sur une estimation a priori, est déterministe et ne fournit pas d'évaluation de l'erreur (en particulier, les fenêtres de détection sont disjointes, ce qui exclut la confusion dans l'identification). Les études à venir consisteront à donner une interprétation probabiliste des caractéristiques du signal en partant des assertions suivantes :

- la densité des rayons est telle qu'il existe toujours un rayon dans une fenêtre de détection donnée,

- les caractéristiques du paquet d'énergie fournissent des lois de probabilité telles que, en désignant par t_1 , t_2 , t_3 , les temps de groupes des trois fronts :

$$P(t_1 < t_2, t_1 < t_3) = 1$$

$$P(t_3 > t_1, t_3 > t_2) = 1$$

$P(A_3 > A_1, A_3 > A_2) = P_i(A)$ où $P_i(A)$ est une loi de probabilité sur les amplitudes à définir traduisant la probabilité de confusion d'identification dans le cas de fenêtres de détection non-disjointes.

4. CONCLUSION

Nous avons présenté dans cet article une méthode d'interprétation du signal acoustique tomographique dans le cas d'arrivées non résolues. Cette méthode repose sur l'identification et l'extraction dans le signal de caractéristiques stables interprétables en terme de rayons. Dans le cas de la campagne GASTOM, les fluctuations du rapport S/B rendent difficile l'utilisation des algorithmes usuels de détection-estimation. Néanmoins, des traitements simples de seuillage ou filtrage adapté peuvent s'avérer robustes en leur injectant des estimations connues a priori. Ils permettent notamment de couvrir l'ensemble du spectre des fluctuations des temps d'arrivée par la détection des phénomènes liés à la marée et de ceux liés à la mésos-échelle. Ce sont d'ailleurs les deux grands axes de l'exploitation et l'interprétation océanographique des données de la campagne GASTOM 90.

REFERENCES

- ¹ Munk, W., Wunsch, C. (1979), Deep-sea research, 26A, 123-161.
- ² The Ocean Tomography Group (1982), Nature, Vol 299, 121-125.
- ³ Martin-lauzer F.R., Mauuary D., Evennou F., (1993), ASPOE, NATO ASI series, Moura & Lourtie Eds, 447-452.
- ⁴ Spindel, R.C (1985), in Adaptive Methods in Underwater Acoustics, edited by Urban H.G (Reidel, Dordrecht).
- ⁵ Stéphan Y., Martin-Lauzer F.R., (1992), rapport 18/92/CMO/EO.
- ⁶ Hippenstiel R., Chaulk E., Miller J. (1992), JASA 92(3), 1759-1763.
- ⁷ Spiesberger J.L., Metzger K., (1991), JGR, Vol 96-C3, 4869-4889.
- ⁸ Stéphan Y., Martin-Lauzer F.R., (1992), rapport 22/92/CMO/EO.