

# Estimation des temps d'arrivée pour la méthode des Sources images combinant l'opérateur de Teager-Kaiser et la transformée de Stockwell

A DRIRA<sup>1</sup>, A.O BOUDRAA<sup>1</sup>, L GUILLON<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IRENav, Ecole Navale,

BCRM Brest, CC 600, 29240 Brest Cedex 9, France

achraf.drira@ecole-navale.fr, abdel.boudraa@ecole-navale.fr

laurent.guillon@ecole-navale.fr

**Résumé** – Dans ce travail nous nous intéressons au problème d'estimation des temps d'arrivée en inversion géoacoustique pour la méthode des sources images. Cette approche, basée sur l'étude des signaux réfléchis par un fond sédimentaire, permet d'estimer les paramètres géoacoustiques des sédiments stratifiés. Une étape cruciale de cette inversion est l'estimation des temps d'arrivée associés aux différentes réflexions en particulier dans le cas des signaux très bruités. Nous proposons dans ce papier une stratégie robuste combinant l'opérateur d'énergie de Teager-kaiser (TK) et une représentation temps fréquence basée sur la transformée de Stockwell pour l'estimation des temps d'arrivée. Nous illustrons cette méthode d'estimation sur les signaux synthétiques et réels et nous comparons les résultats à ceux de la vérité terrain

**Abstract** – In this work we study the problem of the estimation of the time delays in geoacoustic inversion using the images source method. This approach, based on the study of signals reflected from a sedimentary background, allows to estimate the geoacoustic parameters of the stratified sediments. The key step in this inversion is the estimated of the arrival time associated with different reflections. We propose in this paper a robust strategy combining the Teager-Kaiser (TK) energy operator and a time-frequency representation based on the Stockwell transform to estimate the arrival times. We illustrate this estimation method on synthetic and real signals and we compare the results with those of the ground truth.

## 1 Introduction

Le modèle des sources images (ISM) est un outil d'analyse bien établi dans de nombreux domaines de l'acoustique et de l'ingénierie [1]. Ce modèle montre que les réflexions du son, de la source acoustique, peuvent être considérées comme des signaux directs provenant des sources virtuelles, placées symétriquement de l'autre côté, de chaque paroi, en tant que sources images. A l'origine, l'ISM a été utilisée pour calculer la réponse impulsionnelle (RI) de la pièce à partir d'une source à un récepteur acoustique dans une chambre de simulation [2]. L'intérêt de l'ISM repose sur sa simplicité conceptuelle, ce qui rend les algorithmes basés sur ISM relativement simple à mettre en oeuvre [1]. Par conséquent, la technique de l'ISM a été utilisée comme un principe de base pour plusieurs applications telles que la prédiction de la propagation du son, contrôle du bruit, intelligibilité de la parole, transmission, la modélisation et la conception architecturale [1]. Récemment, une stratégie d'inversion géoacoustique en acoustique sous-marine basée sur l'ISM a été introduite et validée sur des données synthétiques et réelles [3], [4]. Plus précisément, la RI du milieu acoustique modélise la propagation du son provenant d'une source acoustique à un hydrophone. Ce modèle de réponse impulsionnelle (MRI) est une somme d'impulsions de Dirac re-

tardées et atténuées qui correspondent à la voie directe de la source à l'hydrophone et de toutes les réflexions du fond marin. Une étape cruciale de la stratégie d'inversion ISM est l'estimation des temps d'arrivée qui correspondent aux positions des pics associés aux différentes réflexions. Dans [4] l'opérateur d'énergie de Teager-Kaiser (TK) [5] a été utilisé pour la détection des pics dû à son excellente résolution temporelle et sa rapidité de calcul. Un aspect important de cet opérateur est qu'il amplifie les discontinuités et les brusques changements d'amplitude tandis que les faibles transitions entre les échantillons sont réduites. Les pics de la sortie de l'opérateur d'énergie de TK correspondent aux temps d'arrivée. Même si les résultats d'inversion sont intéressantes, les performances de la méthode d'inversion peuvent être affectées dans des environnements très bruités. En raison de la sensibilité de l'opérateur TK au bruit élevé, des pics parasites peuvent être produits et fournissent de mauvaises estimations. C'est également le cas en présence du bruit impulsif rencontré en acoustique sous-marine. Une solution à ce problème peut être le débruitage des signaux reçus sur les hydrophones. Toutes fois, le débruitage n'est pas sans effets négatifs (sous débruitage, sur débruitage). En plus le débruitage peut affecté la structure temporelle des arrivées et le sous débruitage ne réduit pas le nombre de fausses réflexions. Pour plus de robustesse au bruit, dans cet article la détection de pics est faite

dans le plan temps-fréquence (Transformée de Stokwell) domaine où l'opérateur d'énergie de TK est appliqué en lignes et en colonnes à la présentation.

## 2 INVERSION-ISM

L'ISM-inversion est une technique récemment mise au point pour l'inversion géoacoustique [3], donnant le profil de vitesse locale du son avec une bonne résolution et un faible coût de calcul par rapport aux approches classiques [8]. L'inversion est basée sur l'analyse d'une onde acoustique émise par une source à large bande et réfléchi par un fond stratifié [4] où un seul enregistrement de l'onde réfléchi sur un réseau d'hydrophones est utilisé (Fig. 1a). Sous l'approximation de Born [3], le signal réfléchi peut être modélisé comme une somme des contributions de sources images qui sont symétriques par rapport à la source réelle par rapport aux couches du fond marin (Fig. 1b). Les positions de ces sources images sont liées aux profils de vitesse du son (SSP) de ces couches. Ainsi, cette structure peut être inversée par la détection de ces sources images. La première étape de l'ISM-inversion est la détection et la localisation de sources images dans un milieu homogène (Fig. 1b). Les positions des images sources dépendent de la connaissance de la géométrie des strates, ce qui nous permet de déterminer les deux paramètres d'inversion principaux : le temps de retard ( $t_{ij}$ ) et les angles l'arrivée ( $\theta_{ij}$ ) de chaque image source  $i$  et de chaque hydrophone  $j$  de l'antenne. Avec ces deux paramètres, l'épaisseur et la vitesse du son de chaque couche est estimée de manière récursive, à partir de la première couche à la plus profonde, en utilisant la formule de réfraction de Snell-Descartes.

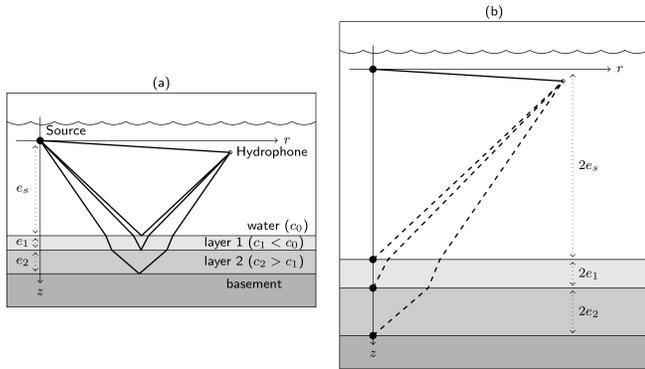


FIGURE 1 – (a) Réflexion d'une source sphérique sur un fond stratifié sous l'approximation de Born. (b) système équivalent avec des sources images en tenant compte de la réfraction (cercle noir).

## 3 Modèle

La réponse du canal acoustique sous-marin peut être décrit par une famille de MRI, qui modélise le canal entre une source

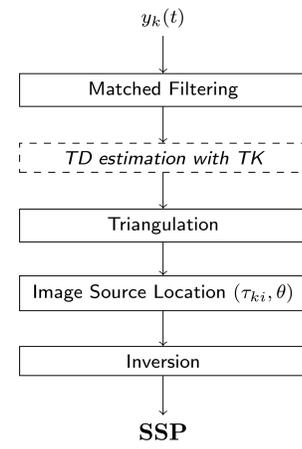


FIGURE 2 – Schéma de l'ISM-inversion.

et un hydrophone. Le phénomène de réflexions multiples provoque un signal d'arrivée à un hydrophone via différents chemins avec différents temps d'arrivée [7]. Cet effet peut être modélisé comme la sortie d'un filtre récursif (FIR) avec une MRI, correspondant à la  $k$ -ième hydrophone, donnée par :

$$h_k(t) = \sum_{i=1}^L \alpha_{k,i} \delta(t - \tau_{k,i}) \quad (1)$$

où  $\delta(t)$  est la fonction delta,  $\alpha_{k,i}$ , et  $\tau_{k,i}$ , représentent respectivement le coefficient d'atténuation et le temps de propagation (temps de retard) de la  $i$ -ième voie.  $L$  est la longueur du filtre de la MRI qui est l'équivalent des chemins identifiés ici comme le nombre d'interfaces de couches. Le trajet direct correspond à l'indice  $i = 1$  dans l'équation (1) et les réflexions correspondent à  $i \neq 1$ . En utilisant la MRI, on trouve le signal reçu par le  $k$ -ième hydrophone comme une convolution entre le signal à large bande  $x(t)$ , émis par la source, et le MIR [7] :

$$y_k(t) = \int x(s) h_k(t - s) ds + n(t)$$

$$y_k(t) = \sum_{i=1}^L \alpha_{k,i} x(t - \tau_{k,i}) + n(t) \quad (2)$$

Notons que l'inversion ISM est limitée aux réflexions de premier ordre [3], [4].

## 4 TK dans le domaine temps-fréquence

Il a été montré récemment l'intérêt de représentations temps-fréquence (RTF) pour la détection des pics ou à des séparation de sources [12]. Nous étudions dans ce travail l'intérêt de combiner l'opérateur d'énergie de TK et la résolution d'une RTF tel que la transformée de Stokwell (TS) pour la détection des pics et en particulier dans des environnements fortement bruités. Un avantage de la TS est qu'elle ne présente pas de termes croisés.

## 4.1 Transformée de Stockwell

La transformée de Stockwell peut être vue comme une TFCT (Transformée de Fourier à Court Terme) mais à fenêtre d'analyse variable ou comme une transformée en ondelettes avec information de phase [10]. La TS notée  $S(\tau, f)$  du signal  $y(t)$ , est définie par :

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi ft} dt \quad (3)$$

En utilisant le théorème de convolution et en calculant la transformée de Fourier de la transformée en S [10], on peut établir une relation directe entre la TS et la TF.

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} Y(\alpha + f) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi ft} dt \quad (4)$$

## 4.2 Opérateur d'énergie de TK

L'opérateur d'énergie de TK est un opérateur de suivi de l'énergie non linéaire et sa sortie à un signal donné,  $y(t)$ , se rapproche de l'énergie physique réelle requise pour produire  $y(t)$ . En continu, l'opérateur énergétique de TK s'écrit :

$$\Psi[y(t)] = \left( \frac{dy(t)}{dt} \right)^2 - y(t) \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \quad (5)$$

Il est évident d'après l'équation (5) que cet opérateur permet de supprimer les parties faiblement variables d'un signal et accentuer les parties brutalement évoluer de ce signal.

## 4.3 TK-TS

La RTF de TS est considérée comme une image dans laquelle les pics sont détectés. L'application de l'opérateur d'énergie de TK sur cette image peut considérée comme une opération d'amélioration de cette représentation et améliorant ainsi la robustesse de la détection des pics. Plus précisément, l'opérateur est appliqué le long des lignes (vecteurs temps) et de colonnes (vecteurs fréquence) de  $S(\tau, f)$  et les résultats du filtrage sommés comme suit : Le masque temps-fréquence créé pour l'estimation des temps de retards est calculée comme suit : où  $\Psi_l[\cdot]$  est appliqué le long de l'opérateur à la composante  $l$ .

$$TS(t, f) = \Psi_t[S(t, f)] + \Psi_f[S(t, f)] \quad (6)$$

$$M(t, f) := \begin{cases} 1 & \text{if } TS(t, f) \geq th \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

où  $th = mean[mean(TS(t, f))]$  est un seuil automatique utilisé pour isoler les pics les plus énergétiques identifiés comme des réflexions[4].

## 5 Résultats

La méthode (TK-TS) a été testée sur des données synthétiques et réelles. D'une part, une comparaison entre les temps d'arrivée théoriques et celle détecté avec TK-TS pour les données

synthétiques pour différents valeurs de RSB et sur les 15 hydrophones. D'autre part, une comparaison entre la vérité terrain et les résultats d'inversion en utilisant le schéma d'inversion de l'ISM illustré dans la figure 2 en détectant les temps d'arrivée avec TK-TS.

## 5.1 Données synthétiques

Les données synthétiques utilisées sont simulés en utilisant l'évolution numérique de l'intégrale de Sommerfield [11] et sous l'approximation de Born [9]. Une source à large bande, 12 m au-dessus du fond marin qui est composée de (N) couches de fluide est utilisée. L'antenne horizontale est composée de 15 hydrophones à la hauteur de la source et 24 m entre la source et le premier hydrophone. Le signal synthétique entaché par un bruit blanc gaussien,  $n(t)$ , avec RSB= -4dB.

Les résultats de TK-TS sont présentés dans les figures 4 et 3.

La figure 4 montre la TS de  $y(t)$  avec un RSB = -4 dB et le masque associé extrait  $M(t, f)$ . Les pics sont bien en évidence sur le masque (Fig. 4) avec l'absence des fausses alarmes. Sur la figure 3, les valeurs montrent que les erreurs relatives en pourcentage sont très faibles même pour des valeurs de RSB= -4 dB, montrant l'intérêt de l'effet de la combinaison du TK et de la TS pour la détection des pics dans les environnements bruités.

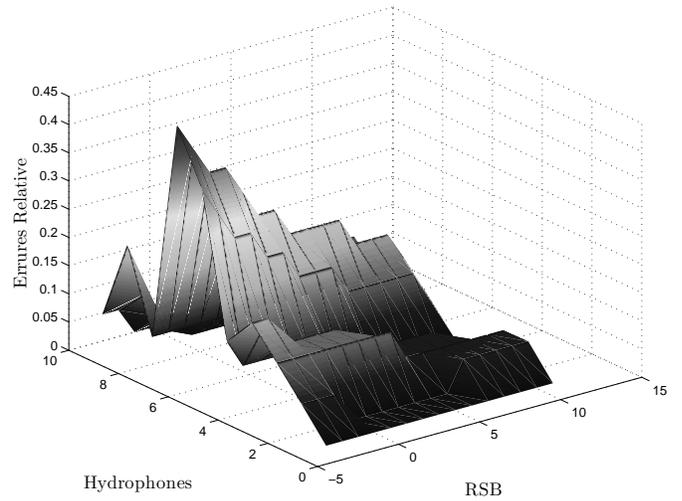


FIGURE 3 – Erreurs relatives des temps d'arrivée détectés avec TK-TS.

## 5.2 Données réelles

Pour illustrer les performances sur des données réelles, des expériences ont été réalisées dans un cuve. Le principe est de reproduire dans un environnement contrôlé une configuration similaire à ce qu'on pourrait avoir dans la mer : une source ponctuelle, un hydrophone, une antenne et un fond marin stratifié. L'avantage est de bénéficier d'un sol stratifié idéal dont les caractéristiques sont connues. Les signaux sont enregistrés

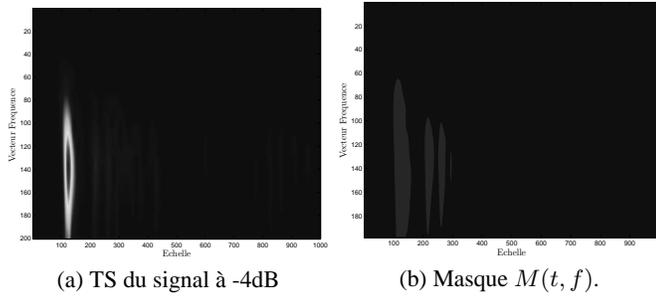


FIGURE 4 – TK-TS.

avec un hydrophone unique dont la position est commandée. Les dimensions de la cuve utilisé pour l’expérience est 2 m de large, 3 mètres de long et 1,5 m de hauteur. La source et l’hydrophones sont des transducteurs de 2 cm de diamètre qui génèrent et enregistrent des signaux sphériques mono-directives. Le milieu stratifié est formé de deux plaques constituées de matériaux différents. Leurs dimensions sont de 50 cm de largeur, 50 cm de long et d’épaisseurs différentes (tableau 1). La première plaque est faite de téflon, et la seconde est faite de résine.

Afin d’augmenter la précision de la détection des temps d’arrivée, le signal envoyé est une période de sinus à la fréquence de 150 kHz. Le spectre le la RI du système composé de plaques est alors obtenu après un filtrage adapté.

Le SSP obtenu avec l’ISM en utilisant la nouvelle approche (TK-TS) pour estimer le temps d’arrivée est présenté dans le tableau 1. Les vitesses du son sont proches de celles mesurées directement à 1 MHz : la différence est inférieure à 2 pour cent . L’estimation de l’épaisseur est moins précise, mais toujours satisfaisante pour la deuxième couche. Le problème de l’estimation de l’épaisseur de la première couche doit être traité dans les futurs travaux .

Method	Parameters	Layer 1	Layer 2
TK-TS	SS (m/s)	1436.1	2065.5
	Thickness (m)	0.054	0.046
Vérité terrain	SS (m/s)	1433 ± 10	2025 ± 10
	Thickness (m)	0.0435	0.0447

TABLE 1 – Les paramètres geoacoustiques des données réelles et estimés par TK-TS

## 6 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une méthode combinant la TS et l’opérateur de TK pour détecter et estimer les temps d’arrivées pour la méthode d’inversion géoacoustique ISM. Les résultats obtenus sur les deux signaux synthétiques et réelles conduisent aux conclusions suivantes. TK-TS est efficace pour détecter les pics correspondant aux réflexions, même pour un faible RSB (- 4 dB), et réduit le nombre de fausses alarmes. La combinaison des deux approches est efficace en

temps d’estimation des temps d’arrivée mais avec un faible temps de calcul supplémentaires. Pour le nouvel algorithme (TK-TS), le seuil est calculé automatiquement à partir des données elles-mêmes. L’inversion SSP effectuée sur des données réelles acquises dans une cuve est satisfaisante par rapport à la vérité terrain.

## Références

- [1] E.A. Lehmann and A. Johansson, “Prediction of energy decay in room impulse responses simulated with an image-source model,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 124, pp. 269-277, 2008.
- [2] J. Allen and D. Berkeley, “Image method for efficiently simulating small-room acoustics,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 64, no. 4, pp. 943-950, 1979.
- [3] S. Pinson and L. Guillon, “Sound speed profile characterization by the image source method,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 128, no. 4, pp. 1685-1693, 2010.
- [4] A. Drira, L. Guillon and A.O. Boudraa, “Image source detection for geoacoustic inversion by the Teager-Kaiser energy operator,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 135, no. 6, pp. 258-264, 2014.
- [5] J.F. Kaiser, “Some useful properties of Teager’s energy operators,” *Proc. ICASSP*, vol. 3, pp. 149-152, 1993.
- [6] M. Gautier, V. Berg and D. Noguét, “Wideband frequency domain detection using Teager-Kaiser energy operator,” *Proc. CrownCom*, pp. 1-6, 2012.
- [7] J. Smith and B. Friedlander *Adaptive Multipath Delay estimation. Reprinted in Coherence and Time Delay Estimation*. IEEE Press Book, 1993.
- [8] Ch. Holland and J. Osler, “High resolution geoacoustic inversion in shallow water : A joint time and frequency domain technique,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 107, no. 3, pp. 1263-1279, 2010.
- [9] R.W. Clayton and R.H. Stolt, “A Born-wkby inversion method for acoustic reflection data,” *Geophysics*, vol. 46, no. 11, pp. 1559-1567, 1981.
- [10] Z.Bouguila, *etal* “Nouvelle méthode de detection des perturbations dans les signaux électriques basée sur la transformée de Stockwell” *XXIVe Colloque GRETSI Traitement du signal et images*, Brest, France, 3-6, septembre 2013.
- [11] L. Brekhovskikh and Y. Lysanov. *Fundamentals of Ocean Acoustics*, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
- [12] O. Yilmaz and S. Richard, “Blind separation of speech mixtures via time-frequency masks,” *IEEE Trans. Sig. Proc.*, vol. 52, no. 7, pp. 1830-1847, 2004.