



## **Estimation de la forme d'une antenne d'hydrophone à l'aide de l'opérateur d'énergie de Teager-Kaiser**

A. Drira, L. Guillon et A.-O. Boudraa

Ecole navale/IRENav, BCRM Brest CC 600, 29240 Brest Cedex 9, France

achraf.drira@ecole-navale.fr

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'estimation de la forme d'une antenne d'hydrophones. Le contexte est l'inversion géoacoustique à l'aide de la méthode des sources images qui permet d'obtenir le profil local de vitesse du son d'un fond sédimentaire stratifié à l'aide d'un signal émis par une source large bande et reçu sur une antenne d'hydrophone. Cette méthode est très sensible à la géométrie du problème, en particulier à la forme de l'antenne. Nous proposons ici une nouvelle méthode pour estimer cette forme. Elle est basée sur un opérateur quadratique d'énergie, dit de Teager-Kaiser, qui permet d'amplifier les discontinuités et les changements rapides d'amplitude du signal tandis que les transitions douces entre les échantillons sont réduites. Cette propriété permet d'estimer avec une précision importante les temps d'arrivées des signaux sur l'antenne. En utilisant le trajet direct et le premier réfléchi sur le fond, un calcul de triangulation permet d'obtenir la forme de l'antenne de manière rapide, simple, et précise. Cette méthode a été testée de manière très satisfaisante sur des données synthétiques ainsi que sur des données réelles acquises en mer sur une antenne verticale et sur une antenne horizontale.

## 1 Introduction

Les méthodes classiques d'inversion géoacoustique, imposent, en général, des hypothèses sur le milieu de propagation d'une part et sur l'antenne de réception d'autre part. Ainsi la méthode des sources images récemment développée [8,11,12] fournit le profil de vitesse d'un fond sédimentaire avec une bonne précision pour un faible coût de calcul mais elle est très sensible à la géométrie d'acquisition, en particulier, la géométrie de l'antenne de réception. Celle-ci est supposée très souvent rectiligne tout au long de l'expérimentation ce qui n'est pas forcément vérifié lorsqu'il s'agit d'une antenne longue, souple et tractée de type flûte sismique et lors d'une expérimentation en mer, telle que celle qui a servi à supporter cette étude. Du fait des courants marins, il est possible que l'antenne verticale ou horizontale soit déformée. De même, un pendage de la structure peut impliquer que l'antenne ne soit pas perpendiculaire ou parallèle au fond marin.

Différentes méthodes d'estimation des erreurs liées à la distorsion de l'antenne ont été proposées dans la littérature [3],[6]. Par exemple dans [3], deux sources de référence, de positions relatives connues, sont utilisées pour réduire les distorsions et corriger les positions des capteurs. Dans [4,12] les auteurs supposent que la forme de l'antenne est connue. A titre d'exemple dans [12] la correction de l'antenne est basée sur la comparaison des phases des impulsions provenant de la source et de la première onde réfléchi sur le fond afin de déterminer l'erreur du temps d'arrivée.

Dans ce travail, nous ne faisons aucune hypothèse sur la forme de l'antenne. Comme dans [5] et [6], la correction est réduite à un problème d'optimisation. Pour estimer la vraie forme de l'antenne, nous présentons tout d'abord un traitement permettant de calculer avec précision le temps d'arrivée du trajet direct et du premier réfléchi enregistrés par le réseau des capteurs. Cette première étape de traitement est basée sur un opérateur quadratique d'énergie, dit de Teager-Kaiser [7], qui permet d'amplifier les discontinuités et les changements rapides des amplitudes du signal tout en atténuant les transitions douces. Cette étape clé est une alternative aux méthodes de détection basées sur la phase [8] avec comme avantage la rapidité des calculs et la facilité de mise en œuvre.

L'objectif de ce papier est de préciser, dans un premier temps, la nature des données caractéristiques du problème ainsi qu'une explication rapide de la méthode des sources images. Dans une deuxième étape, en insistant sur leurs

spécificité, l'opérateur d'énergie Teager-Kaiser, détecte les temps d'arrivées que nous utilisons ensuite pour estimer la forme de l'antenne avec deux méthodes différentes. La première consiste à résoudre le système non linéaire du problème de triangulation, la seconde consiste à optimiser une fonction des erreurs quadratiques. Finalement, nous terminons par une présentation des résultats d'inversion sur des données simulées et réelles.

## 2 Nature du problème

### 2.1 Configuration

La configuration utilisée en exemple (figure 1), est choisie pour être similaire à la configuration de la campagne CLUTTER'09 [8]: un AUV navigue près du fond et tracte une source et une antenne de 32 hydrophones (figure 1). Les distances sont telles que l'angle d'incidence du signal sur le fond est de l'ordre de  $45^\circ$ .

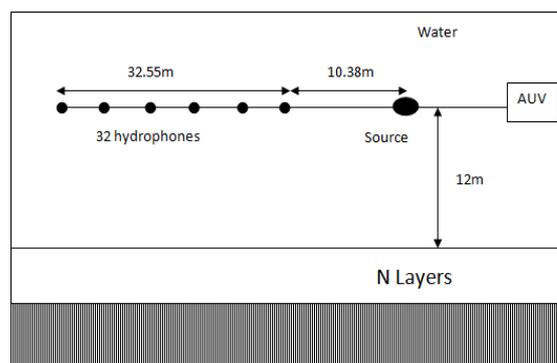


Figure 1: Configuration expérimentale.

Une antenne souple subit des déformations dues essentiellement aux mouvements de la mer et du bateau, ces déformations se traduisent, en général, par des déplacements des capteurs par rapport à leurs positions d'origine.

### 2.2 Méthode des sources images

La méthode des Sources d'images (ISM) [8] est une technique récemment développée pour l'inversion géoacoustique qui donne le profil de vitesse local du son avec une bonne résolution et à faible coût de calcul par

rapport aux approches classiques [14]. Cette inversion est basée sur l'analyse d'une onde acoustique émise par une source large bande et réfléchi par un fond marin stratifié [2] où un seul enregistrement du réfléchi du fond sur une antenne d'hydrophone pour un seul tir de la source est utilisé (Fig. 1a). Sous l'approximation de Born [11], le signal réfléchi peut être modélisé comme une somme de contributions provenant de sources d'image qui sont symétriques à la source réelle par rapport aux couches du fond marin (figure 1.b). Les emplacements de ces sources d'image sont liées au profil de vitesse de ces couches, il est donc possible d'inverser cette structure par détection des sources d'image.

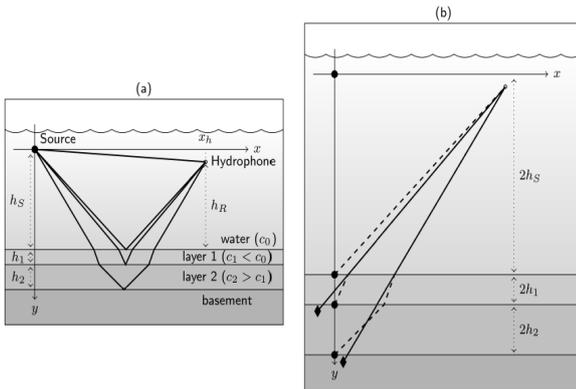


Figure 2 : (a) Réflexion d'une source sphérique sur un fond stratifié sous l'approximation de Born. (b) système équivalent avec des sources d'image en tenant compte de la réfraction (cercle noir) ou non (diamant noir).

La première étape de l'ISM est la détection et la localisation des sources d'image dans un milieu homogène (Fig.1b). La localisation des sources images dépend de la bonne connaissance de la géométrie de l'antenne, ce qui nous permet de déterminer les deux principaux paramètres d'inversion, les temps ( $t_{ij}$ ) et les angles ( $\theta_{ij}$ ) de l'arrivée de chaque source d'image  $i$  à chaque hydrophone  $j$  de l'antenne.

La première source d'image, correspondant à la propagation uniquement dans l'eau, peut être utilisée pour obtenir la géométrie du système. Ensuite, le temps d'arrivée et l'angle de la deuxième source d'image donnent la vitesse et l'épaisseur de la première couche par la loi de Snell-Descartes. De manière récursive, ces quantités sont alors obtenues pour toutes les couches.

### 2.3 Détection du temps d'arrivée

L'idée de l'opérateur de Teager-Kaiser (TK) a été développée par Teager dans les années 90 pour caractériser les propriétés d'écoulement d'air à travers le tube de la glotte et vocale. La modélisation de l'opérateur TK a été développée par Kaiser [7]. Cet opérateur non linéaire peut être vu comme une technique de suivi d'énergie d'un signal. Appliqué à un signal donné,  $x(t)$ , la sortie de l'opérateur correspond à l'énergie physique réelle requise pour produire  $x(t)$ . Un aspect important de l'opérateur TK est qu'il est quasi instantané étant donné que trois échantillons à chaque instant du temps seulement sont nécessaires dans son calcul. Il amplifie les discontinuités et

les changements soudains des amplitudes de  $x(t)$ , tandis que les transitions douces entre les échantillons sont réduites. Cet opérateur a trouvé de nombreuses applications, notamment dans le traitement de la parole [9],[10]. Des recherches importantes sur la théorie et les applications de l'opérateur TK ont été réalisées. La majorité des applications de l'opérateur en TK en traitement du signal et des images a principalement porté sur la démodulation des signaux AM-FM et non sur l'opérateur lui-même [14]. L'opérateur TK appliquée à un signal  $x(t)$  est défini par :

$$\psi[x(t)] = \left( \frac{dx(t)}{dt} \right)^2 - x(t) \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad (1)$$

Dans le cas du signal discret  $x(n)$ , TK peut être approché comme suit :

$$\psi[x(n)] = x^2(n) - x(n+1)x(n-1) \quad (2)$$

L'équation (1) montre que l'opérateur TK calcule une énergie à chaque instant en tenant compte des échantillons voisins immédiats. Ainsi, il est justifié que l'opérateur TK peut être appliqué au problème de la détection car il calcule le rapport d'énergie instantanée à ses voisins immédiats.

La figure 3 représente un signal synthétique, pour la configuration décrite dans la première partie, dans sa version déconvoluée et contaminée par un bruit blanc gaussien de RSB=3 dB. Les pics à la sortie de l'opérateur de TK correspondent aux temps d'arrivée, mais peuvent également être attribués au bruit. Pour éviter ce problème, un seuil,  $S$ , est utilisé pour isoler les pics les plus énergétiques qui sont considérés comme la réflexion des ondes sur la surface. Plus précisément, ce seuil est introduit afin de minimiser le nombre de faux pics dus au bruit tout en gardant le nombre des vrais pics détectés, dans une limite raisonnable. Pour cela, la valeur de  $S$  est prise comme une version à l'échelle de la moyenne de la sortie du TK:

$$S = \frac{C}{N} \sum_{n=1}^N \psi[x_k(n)] \quad (3)$$

où  $x_k$  est le signal reçu par  $k$ -ième l'hydrophone,  $N$  étant le nombre d'échantillons, et  $C$  est le facteur de mise à l'échelle. Ce facteur d'échelle dépend essentiellement du RSB d'entrée. Pour le signal de synthèse présente, en positionnant  $C$  à 0,9 les vrais pics sont détectés avec succès

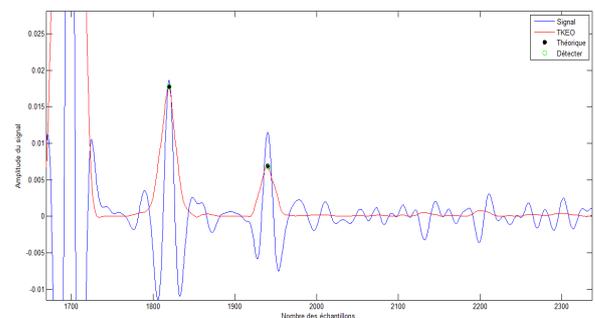


Figure 2: Détection des temps d'arrivée avec l'opérateur de TKEO.

L'exemple du signal ci-dessus montre que la détection des pics avec l'opérateur de TK correspond bien aux réflexions théoriques des ondes provenant du fond.

### 3. Triangulation

Puisque l'on considère que la célérité  $C_0$  est constante dans l'eau, la distance entre la source et les hydrophones (fig. 3) sont calculées simplement par :

$$D_n^{s,im} = C_0 T_n^{s,im} \quad (4)$$

où  $T_n^s$ ,  $T_n^{im}$  sont respectivement les temps d'arrivées du trajet direct premier réfléchi à l'hydrophone  $n$ .

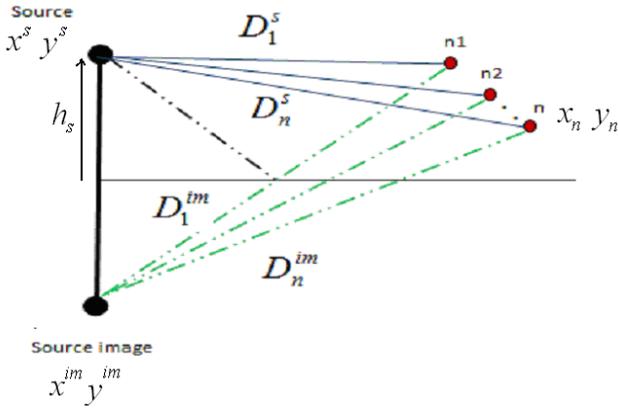


Figure 3 : Représentation des distances entre la source et les hydrophones et des distances entre la première image source et les hydrophones

Si l'antenne rectiligne subit des petites déformations, il est possible d'appliquer des corrections sur coordonnées des hydrophones pour déduire la géométrie réelle de l'antenne. Cette reconstruction géométrique de la forme de l'antenne est possible à partir de la connaissance de la cordonnée de la source (fixée au centre du repère), profondeurs source fond et les distances source capteurs trouvées dans la première partie. On résout le système non linéaire suivant :

$$(x_{nj} - x_{n(j-1)})^2 + (y_{nj} - y_{n(j-1)})^2 = D_n^2 \quad (5)$$

$$t_{0j} = \frac{(2h_s - y_{nj})}{C_0 \cos \theta_{0j}} \quad (6)$$

$$(2h_s - y_{nj}) \tan \theta_{0j} = x_{nj} \quad (7)$$

où  $h_s$  est la hauteur de la source au fond et  $\theta_{0j}$  est l'angle d'arrivée. A la fin de cette étape, on a les trois paramètres  $(x_{nj}, y_{nj}$  et  $\theta_{0j})$  qui présentent les coordonnées des hydrophones ainsi que l'angle d'arrivée de la 1ère source image qui présente un paramètre principal pour remonter aux paramètres géoacoustique.

A partir de la configuration de mesure proposée, un jeu de données a été simulé avec une antenne déformée et un fond stratifié quelconque. Sans supposé que l'antenne est rectiligne en la corrigeant avec la méthode décrite ci-dessus, la forme de l'antenne retrouvée est très proche de celle du modèle (Fig. 4). Il faut noter qu'une erreur de détection de l'ordre d'un échantillon a été ajoutée au temps de détection pour simuler des conditions plus réalistes.

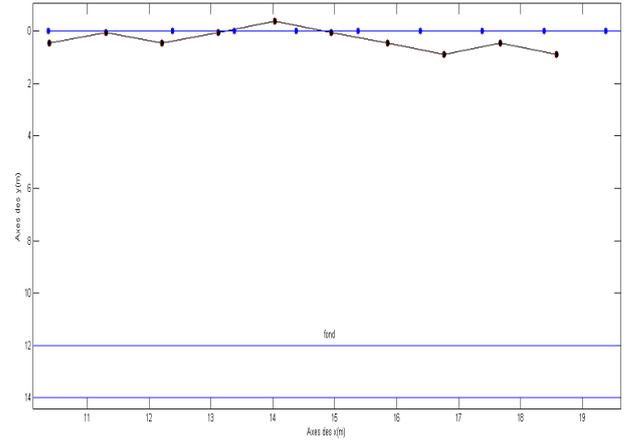


Figure 4: Forme de l'antenne corrigée avec la nouvelle méthode (triangulation). Bleu : antenne rectiligne, Noir : forme d'antenne trouvée, Rouge : position théorique.

On note que les positions théoriques sont parfaitement trouvées par la méthode de triangulation telle façon que les points rouges sont indiscernable.

### 4 Optimisation

La deuxième approche de détection est basée sur l'optimisation d'une fonction d'erreurs. L'idée est de rajouter des termes d'erreur sur les positions d'origine et de chercher à optimiser:

$$D_n^{s,im} = \sqrt{(x^{s,im} - x_n)^2 + (y^{s,im} - y_n)^2} \quad (8)$$

En présence d'erreurs on a :

$$x_n = x_n + \delta_{xn} \quad (9)$$

$$y_n = y_n + \delta_{yn} \quad (10)$$

On trouve la forme suivante :

$$D_n^{s,im} = \sqrt{(x^{s,im} - x_n + \delta_{xn})^2 + (y^{s,im} - y_n + \delta_{yn})^2} \quad (11)$$

Qui devienne après un développement limité au premier ordre :

$$D_n^{s,im} = \sqrt{a^2 + b^2} \left( 1 + \frac{a\delta_{xn} + b\delta_{yn}}{a^2 + b^2} \right) \quad (12)$$

Avec

$$a = x_{s,im} - x_n \quad (13)$$

$$b = y_{s,im} - y_n \quad (14)$$

$$\operatorname{argmin}_{\delta_{xn}, \delta_{yn}} \left( \sum_{n=1}^n D_n^{s,im} - \sqrt{a^2 + b^2} \left( 1 + \frac{a\delta_{xn} + b\delta_{yn}}{a^2 + b^2} \right) \right) \quad (15)$$

On trouve les résultats suivants :

$$\delta_{xn} = D_n^{s,im} \frac{\sqrt{a_{s,im}^2 + b_{s,im}^2}}{a_{s,im}} - \frac{a_{s,im}^2 + b_{s,im}^2}{a_{s,im}} - \frac{b_{s,im}}{a_{s,im}} \delta_{yn} \quad (16)$$

$$\delta_{yn} = D_n^{s,im} \frac{\sqrt{b_{s,im}^2 + a_{s,im}^2}}{b_{s,im}} - \frac{a_{s,im}^2 + b_{s,im}^2}{b_{s,im}} - \frac{a_{s,im}}{b_{s,im}} \delta_{xn} \quad (17)$$

Comme ces équations sont bijectives, on peut trouver la correction suivant un des axes si on connaît la correction sur l'autre. Autrement dit si on connaît la correction suivant  $\delta_{xn}$  on peut déduire  $\delta_{yn}$  ou l'inverse.

Pour déterminer l'erreur suivant l'un des axes on utilise les données du trajet direct ainsi que le réfléchi, on trouve la relation suivante :

$$\delta_{yn} = \frac{\left[ \frac{D_n^{im} \sqrt{a_{im}^2 + b_{im}^2}}{a_{im}} - D_n^s \frac{\sqrt{a_s^2 + b_s^2}}{a_s} \right] + \left[ \frac{a_s^2 + b_s^2}{a_s} - \frac{a_{im}^2 + b_{im}^2}{a_{im}} \right]}{\left[ \frac{b_s}{a_s} \quad \frac{b_{im}}{a_{im}} \right]} \quad (18)$$

Nous estimons les positions des hydrophones que nous avons préalablement perturbés de façon aléatoire (Fig. 5).

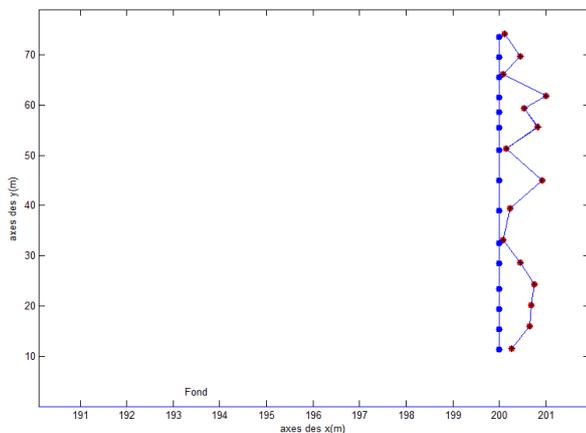


Figure 5: Forme de l'antenne corrigée avec la nouvelle méthode (Optimisation quadratique). Bleu : antenne rectiligne, Noir : forme de l'antenne estimée, Rouge : positions théoriques.

La forme de l'antenne retrouvée est très proche de celle du des valeurs théoriques. Les deux méthodes de correction estiment correctement la vraie forme de l'antenne mais la méthode de triangulation est plus sensible à l'erreur liée temps de détection.

## 5. Résultat

### 5.1 Données simulées

La configuration utilisée est celle décrite dans la première partie. La source transmet une impulsion de 1s avec une fréquence linéaire modulée 1600-3500 Hz.

Le fond est constitué de deux couches homogène (Tableau 1). Les paramètres géoacoustiques sont estimés avant et après la correction (Tableau 1). Les positions des hydrophones sont perturbées en ajoutant des valeurs aléatoires comprises entre 0 et 1m.

Tableau 1: Comparaison des résultats de l'inversion géoacoustique du milieu simulé avant et après correction de la forme de l'antenne

	Données théoriques	Avec correction	Sans correction
Epaisseur (m)	2	1.99	1.49
<b>Célérité (m/s)</b>	1650	1650.1	1482
Epaisseur (m)	2	1.99	3.35
<b>Célérité (m/s)</b>	1750	1750.1	1664.1

On remarque que l'inversion des données est fortement influencée par la bonne connaissance de la géométrie de l'antenne, ce qui nous permet, après la correction, de remonter aux paramètres géoacoustiques.

### 5.2 Données réelles

Un exemple de forme d'antenne retrouvée pour un jeu de données réelles (Données SCARAB) [1] est présenté dans la figure 6. Il faut noter qu'en réalité la déformation de l'antenne se fait dans les trois dimensions. Quoiqu'il soit, cette reconstruction en 2D permet ensuite de pouvoir focaliser parfaitement sur la première source image ainsi que de la positionner parfaitement sur la verticale de la source réelle.

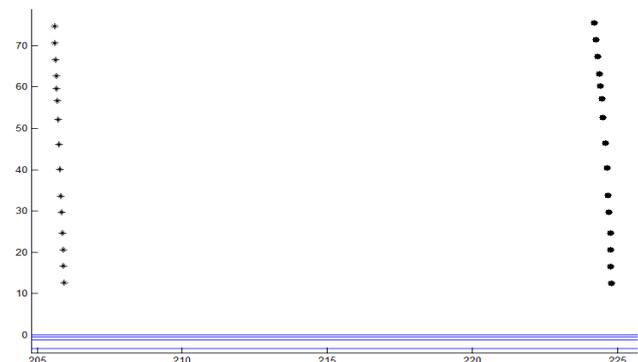


Figure 6: Forme de l'antenne corrigée avec la nouvelle méthode (Triangulation), Étoile : les positions des hydrophones initiaux, point : les positions des hydrophones corrigés.

La correction de la forme de l'antenne influence la qualité des résultats. A titre d'exemple, le tableau ci-dessous, présente cette inversion calculée après correction. Alors que dans le cas où l'on considère l'antenne comme rectiligne les résultats sont aberrants.

On constate aussi qu'une simple correction de l'inclinaison de l'antenne par rapport à l'horizontale [8] sous l'effet du pendage de la structure n'est pas suffisante car les sources images sont très mal détectées avec l'antenne supposée linéaire. Au contraire, avec l'antenne corrigée, les sources images apparaissent clairement près de la verticale de la source.

Les résultats obtenus sont comparés à ceux de la méthode de Holland et OSLER [1] qui a déjà éprouvé sa fiabilité pour les premières couches avec des mesures directes.

Tableau 2: Comparaison des résultats de l'inversion géoacoustique du milieu réel après la correction de la forme de l'antenne

	TK	H&O
Epaisseur (m)	1.4	1.1
Célérité (m/s)	1560	1551
Epaisseur (m)	2.99	3.3
Célérité (m/s)	1517.9	1516
Epaisseur (m)	6.44	4.8
Célérité (m/s)	1526.8	1527
Epaisseur (m)	14.19	15
Célérité (m/s)	1542.3	1555

## 5 Conclusion

La correction de la forme de l'antenne présentée, ne nécessite pas la connaissance, a priori, de la forme de l'antenne pour corriger les données. Le problème est réduit à celui de l'optimisation d'une fonction coût. Nous avons exploité l'aspect instantané de l'opérateur d'énergie de Teager-Kaiser pour l'estimations des temps d'arrivée. Les deux sources réelle et imaginaire ont les mêmes coordonnées car l'une est l'effet miroir de l'autre par rapport au fond. Ces jeux de données nous permet de retrouver la vraie forme de l'antenne horizontale ou verticale avec une simple optimisation de l'erreur ont ajoutée (Optimisation quadratique de l'erreur) ou a résolu un système non linéaire (Triangulation). La méthode appliquée dans le cas d'un déplacement d'antenne en 2D, alors qu'en réalité la déformation de l'antenne se fait dans les trois dimensions

## Remerciements

Les auteurs tien a remercier Charles Holland (penn state University) pour la mise en disposition les données SCARB et CLUTTER.

## Références

[1] Holland and J. Osler, High resolution geoacoustic inversion in shallow water: A joint time and frequency domain technique, J. Acoust. Soc. Am., vol.107 , 1263 (2000).

[2] A. Drira, L. Guillon, A. Boudraa, "Image sources detection for geoacoustic inversion by TKEO", Conf UAC, Corfou , June 2013.

[3] S. Marcos, "Calibration of a distorted towed array using a propagation operator", J. Acoust. Soc. Am., vol. 93, no. 4, pp. 1987-1994, 2003.

[4] S. Bourennane and M. Firikel, "localization of wideband sources with estimation of an antenna shape", Proc. IEEE workshop on SSAP, pp. 97-100, 1996.

[5] W. Branderburg, "A point mechanical model for the dynamics of towed arrays", Proc. ICASSP, pp. 194-197, 1984.

[6] D.J. Edwards and A.J. Keane, " Numerical techniques for efficient sonar bearing and range searching in the near field using genetic algorithms", in Evolutionary Algorithms in Engineering Applications, Ed. D. Dasgupta and Z. Michalewicz, Springer-verlag, 1997

[7] J.F. Kaiser, "Some useful properties of Teager's energy operators," Proc. ICASSP, vol. 3, pp. 149-152, 1993.

[8] S. Pinson. Caractérisation des fonds marins par la méthode des sources images. Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 2011.

[9] P. Maragos and T. Quatieri and J.F. Kaiser, "Speech nonlinearities, modulation and energy operators," Proc. ICASSP, vol. 1, pp. 421-424, 1991.

[10] D. Dimitriadis, A. Potamianos and P. Maragos, "A comparison of the squared energy and Teager-Kaiser operators for short-term energy estimation in additive noise," IEEE Trans. Sig. Proc. vol. 57, no. 7, pp. 2569-2581, 2009.

[11] 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.

[12] S. Pinson, L. Guillon and C. W. Holland, Range dependent sediment sound speed profile measurements using the image source method, J. Acoust. Soc. Am. Vol. 134 , pp.156, 2013.

[13] A.O. Boudraa and J.C. Cexus and K. Abed-Meraim, "Cross-B-energy operator-based signal detection," J. Acoust. Soc. Am, vol. 132, no. 6, pp. 4283-4289, 2008.

[14] R.W. Clayton and R.H. Stol, "A Born-WKBJ inversion method for acoustic reflection data," Geophysics, vol. 64, no. 11, pp. 1559-1567, 1981.