

CFA/VISHNO 2016

La méthode des sources images : un outil pour l'inversion géoacoustique

L. Guillon^a et S. Pinson^b

^aEcole Navale / Irenav, BCRM Brest CC600, 29240 Brest Cedex 9, France

^bLVA UFSC, Bairro Trindade, 88040-900 Florianopolis, Brésil

laurent.guillon@ecole-navale.fr



LE MANS

La méthode des sources images (MSI) est une méthode d'inversion géoacoustique permettant d'obtenir de manière précise et rapide le profil de vitesse du son dans les milieux sédimentaires stratifiés. Elle est basée sur la représentation de signaux réfléchis par les différentes strates à l'aide de sources images, symétriques de la source réelle par rapport aux interfaces. La localisation de ces sources images à partir des signaux enregistrés par une antenne d'hydrophone permet d'estimer le nombre de strates, leur épaisseur, et la vitesse du son. Développée depuis quelques années, la MSI a prouvé son efficacité sur des données acquises en cuve ou en mer avec des antennes verticales ou horizontales. De plus, plusieurs extensions de la MSI ont été proposées permettant d'estimer de nouveaux paramètres des fonds (densité, vitesse des ondes de cisaillement, pendage) ou bien de détecter des objets enfouis. Cet article est une revue des principes, résultats, et extensions de la MSI.

1 Introduction

La connaissance des fonds marins est un enjeu important pour bon nombre d'applications dans les domaines du génie civil, de la géologie, de la biologie, ou de la défense. Les méthodes d'inversion géoacoustique permettent d'accéder à l'estimation de la structure géométrique du fond marin ainsi qu'aux paramètres acoustiques liés aux paramètres physiques des sédiments. Ces techniques se sont développées depuis une trentaine d'année et sont utilisées en complément des méthodes géotechniques basées sur la mesure in-situ ou l'analyse de prélèvements en laboratoire. La caractérisation des fonds par acoustique peut être menée suivant différentes stratégies, par exemple : analyse de données de sonar latéral ou de sondeurs multifaisceaux, matched-field processig, analyse de signaux réfléchis ou diffusés, acoustique passive (cf. [1, 2, 3]).

Dans ce contexte, une méthode d'inversion géoacoustique est développée depuis quelques années à l'École navale : la méthode des sources images (MSI) [4, 5]. Cette approche est basée sur un modèle physique permettant de réduire de manière drastique le nombre de données à inverser et donc d'avoir un algorithme très rapide. La MSI a été appliquée de manière satisfaisante à des données réelles acquises par une antenne verticale [6, 7], une antenne horizontale [8], et des données en cuve [9]. Plusieurs extensions ont été également proposées : estimation de la densité [10], prise en compte de strates solides [11], milieu à strates non parallèles [12], utilisation pour la détection d'objets enfouis [13].

L'objet de cet article est de faire une présentation synthétique de la MSI, tant du modèle physique utilisé (sec. 2) que des algorithmes développés (sec. 3), des résultats obtenus (sec. 4) et des extensions proposées (sec. 5).

2 MSI : principe et algorithme d'inversion

2.1 Hypothèses et principes

La MSI est une méthode d'acoustique active, basée sur l'émission d'une onde omnidirectionnelle large bande dans le domaine des moyennes fréquences, entre 1 et 10 kHz. Cette onde se réfléchit sur le fond de la mer ainsi que sur les strates enfouies et est ensuite enregistrée par une antenne d'hydrophone (Fig. 1). La configuration est telle que le signal réfléchi par la surface arrive à l'antenne suffisamment tard pour ne pas perturber les signaux réfléchis par le fond.

La MSI repose sur trois hypothèses principales :

1. les strates sédimentaires sont fluides, homogènes, et parallèles entre elles,

2. les angles d'incidence sont loin de l'angle critique,
3. les réflexions multiples dans le volume sédimentaire sont négligées.

La première hypothèse peut être partiellement relaxée (cf. section 5). La deuxième hypothèse permet de s'affranchir de l'existence de l'onde latérale et la troisième, qui est l'approximation de Born, est vérifiée pour les milieux sédimentaires stratifiés dans les conditions expérimentales précitées [4].

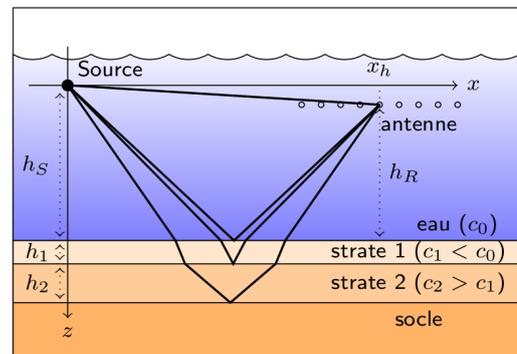


FIGURE 1 – Configuration expérimentale de la MSI. Ici représentée horizontale, l'antenne peut être verticale.

À l'aide de ces hypothèses, chaque onde réfléchie par une strate du volume sédimentaire peut être modélisée comme étant émise par une source image, symétrique de la source réelle par rapport à l'interface considérée. Dans le cas où le profil de vitesse (SSP pour sound speed profile) est connu, la réfraction peut être prise en compte et les sources images se situent alors sur la verticale de la source et leur position est indépendante de la position de l'hydrophone (Fig. 2.a). Elles sont alors appelées « sources images réelles ». Les temps de trajet $t^{(i)}$ et les angles d'arrivée $\theta^{(i)}$ des signaux (i est l'indice de la strate) sont exactement les mêmes que pour la configuration originelle. Ces temps et angles étant liés directement au SSP, la localisation des sources images permet donc une estimation de ce SSP ce qui constitue le principe de la MSI. Cette localisation étant effectuée uniquement à partir des signaux enregistrés, il est nécessaire d'utiliser une antenne composée de N_h hydrophones.

2.2 Modèle direct

Dans le cadre de l'inversion géoacoustique, le SSP est inconnu et la réfraction ne peut plus être prise en compte. Les signaux réfléchis par une strate et reçus par l'antenne sont alors modélisés comme étant émis par une source placée dans l'eau à une position telle que le temps de trajet et l'angle d'arrivée soit ceux mesurés par l'antenne.

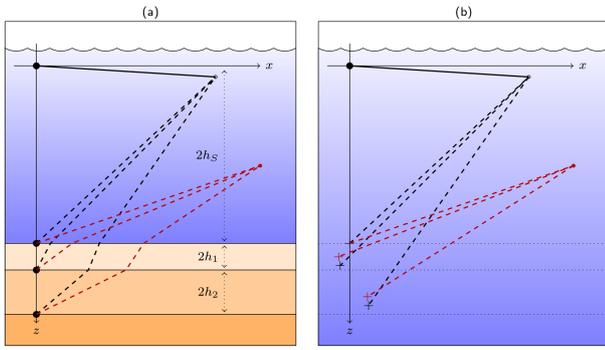


FIGURE 2 – (a) Schéma équivalent à la figure 1 pour 2 hydrophones différents avec les sources images prenant en compte la réfraction. (b) Schéma équivalent sans prendre en compte la réfraction.

Contrairement au cas où la réfraction est prise en compte, la position de cette source appelée par la suite « source image virtuelle » (SIV) dépend maintenant de la position de l'hydrophone (Fig. 2.b). Or, l'algorithme d'inversion de la MSI est basé sur la connaissance du temps de trajet et de l'angle d'arrivée entre deux points (cf. section 2.3) : un récepteur unique et une SIV correspondant à une strate donnée. Cela conduit au compromis suivant : pour localiser les sources images, on utilise une antenne mais cela implique que, pour une strate donnée, on a affaire à un ensemble de N_h SIV (Fig. 3). Le modèle direct de la MSI consiste à remplacer ces deux ensembles de points (antenne et SIV) par deux points uniques : un récepteur équivalent et une source image virtuelle équivalente (SIVE). Pour le récepteur, on utilise la médiane des positions des hydrophones constituant l'antenne ; pour la SIVE, différentes stratégies peuvent être utilisées (cf. section 3).

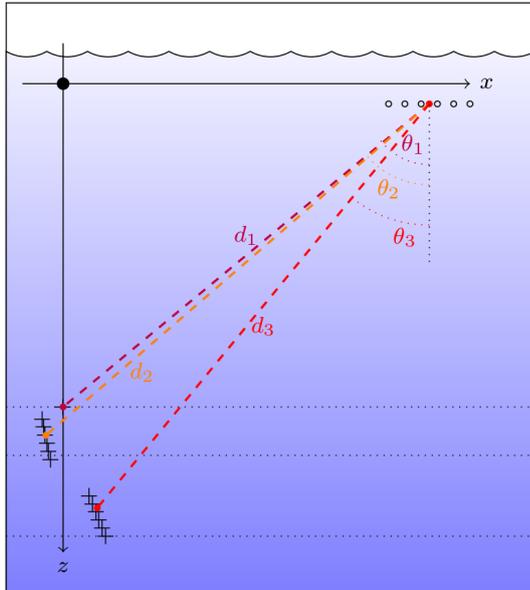


FIGURE 3 – Les croix noires sont les SIV correspondant à la figure 1 et les croix de couleur sont les SIVE.

Considérons un fond constitué de N strates sédimentaires correspondant donc à $N_s = N + 1$ sources images. Dans ce cas, on dispose de $N_t = N_s \times N_h$ temps de trajet pour reconstituer le profil sédimentaire. Le modèle direct de la MSI convertit N_t en $2N_s$ données qui sont les couples $t^{(i)}$

et $\theta^{(i)}$ pour chacune des strates. Cette réduction drastique du nombre de données à inverser explique le faible coût de calcul de la MSI. En théorie des problèmes inverses, on considère classiquement deux types d'incertitudes [14] : celles liées au modèle et celles liées aux données. L'erreur de modèle de la MSI provient de la définition d'une unique SIVE à partir de l'ensemble des SIV. Il a été montré que, tant que l'antenne ne dépasse pas la vingtaine d'hydrophones avec une distance inter-éléments de l'ordre de $\lambda/2$, cette erreur de modèle reste très faible [5].

2.3 Algorithme général et inversion

Les données d'entrée sont les N_h signaux enregistrés par l'antenne. À partir de ces signaux, la MSI se décompose en deux étapes principales :

1. **Localisation des SIVE.** L'algorithme utilisé pour cette étape (cf. section 3) fournit le nombre N_s de strates détectables ainsi que la position de chacune des SIVE des strates qui est donnée par le couple $(t^{(i)}, \theta^{(i)})$, avec $i \in [1, ..N_s]$. Cette localisation se faisant dans un milieu de vitesse constante c_0 , le temps est directement liée à la distance.
2. **Inversion du SSP.** À partir de ces couples, on estime de manière récursive l'épaisseur h_i et la vitesse du son c_i de chacune des strates. Cette étape est détaillée ci-après.

Pour réaliser l'inversion du SSP, quelques informations supplémentaires sont nécessaires : position de la source et des hydrophones, hauteur d'eau sous la source, vitesse du son dans l'eau. Une bonne connaissance de la géométrie de l'antenne est nécessaire à cette étape. Celle-ci peut être estimée à partir des données enregistrées [4, 5].

L'algorithme d'inversion est basé uniquement sur les lois de la réfraction de Snell-Descartes. Les grandeurs estimées sont notées \tilde{c} et \tilde{h} . L'algorithme est récursif, initialisé avec $\tilde{c}_0 = c_0$ et $\tilde{h}_0 = h_s$. Considérons que le SSP a été estimé jusqu'à la strate $i - 1$. À partir de $t^{(i)}$ et $\theta_0^{(i)}$ de la SIVE i , on obtient l'angle d'incidence dans la strate $i - 1$:

$$\theta_{i-1}^{(i)} = \arcsin(\tilde{c}_{i-1} \sin \theta_0^{(i)} / c_0). \quad (1)$$

Ensuite, le temps de trajet dans la strate i est obtenu en soustrayant la somme des temps de trajet dans les strates supérieures au temps de trajet total :

$$t_s^{(i)} = t^{(i)} - \sum_{k=0}^{i-1} \frac{\tilde{h}_k}{\tilde{c}_k \cos \theta_k^{(i)}}. \quad (2)$$

La vitesse du son dans la strate i est finalement estimée par :

$$\tilde{c}_i = \sqrt{\frac{c_0}{t_s \sin \theta_0^{(i)}} \left[x_H - \sum_{k=0}^{i-1} \tilde{h}_k \tan \theta_k^{(i)} \right]}, \quad (3)$$

et l'épaisseur par :

$$\tilde{h}_i = \tilde{c}_i t_s \cos \left[\arcsin \left(\frac{\tilde{c}_i \sin \theta_0^{(i)}}{c_0} \right) \right]. \quad (4)$$

L'aspect récursif de l'algorithme n'implique pas de propagation d'erreur. En effet, il a été montré que l'erreur commise sur l'estimation des paramètres d'une strate était compensée par l'estimation des paramètres de la strate suivante et ne se propageait pas au-delà [4].

3 Localisation des sources images virtuelles équivalentes

3.1 Migration - Semblance

La localisation des sources images peut-être rendue possible par l'utilisation de techniques d'imagerie par traitement d'antenne. Si une source localisée en $\mathbf{r} = (x, z)$ émet un signal au temps $t = 0$, le signal sera reçu par l'hydrophone de coordonnée \mathbf{r}_n au temps $t_n(\mathbf{r}) = \|\mathbf{r}_n - \mathbf{r}\|/c_0$ où c_0 est la célérité dans l'eau. Pour imager si une source a émis depuis la coordonnée \mathbf{r} il suffit de sommer les instants correspondant des signaux issus de chaque hydrophone :

$$\mathcal{I}_m(\mathbf{r}) = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_n^{\mathcal{H}}(t_n(\mathbf{r})) \right|^2, \quad (5)$$

où $s_n^{\mathcal{H}}(t)$ est le signal analytique enregistré par l'hydrophone n (l'index \mathcal{H} réfère à la transformée de Hilbert).

La fonction $\mathcal{I}_m(\mathbf{r})$ est donc une fonction d'imagerie par migration des signaux enregistrés jusqu'à l'instant $t = 0$ où les signaux ont été émis. L'amplitude sur la carte ainsi obtenue dépend de l'intensité du signal de ces sources et cela rend une localisation automatisée difficilement faisable. Par conséquent, en plus de la fonction $\mathcal{I}_m(\mathbf{r})$, on utilise une fonction de semblance :

$$\mathcal{I}_{semb}(\mathbf{r}) = \frac{\left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_n^{\mathcal{H}}(t_n(\mathbf{r})) \right|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| s_n^{\mathcal{H}}(t_n(\mathbf{r})) \right|^2}, \quad (6)$$

dont le résultat vaut 1 si les signaux sommés sont parfaitement en phase. En appliquant un seuil à cette nouvelle carte, on peut ainsi sélectionner des zones de l'espace où des sources images sont présentes. Dans ces zones, il ne reste plus qu'à localiser les maxima locaux de la fonction $\mathcal{I}_m(\mathbf{r})$ pour connaître les positions des SIVE. Cette méthode est appelée MSI-MS (pour Migration-Semblance) dans la suite.

3.2 TKEO - triangulation

La deuxième approche étudiée pour localiser les SIVE est basée sur une détection très précise des temps d'arrivée des signaux sur les hydrophones [7]. Cette détection se fait par l'opérateur de Teager-Kaiser (TKEO) qui permet d'estimer localement l'énergie d'un signal. En temps discret, TKEO appliqué à un signal $x(n)$ peut s'écrire comme suit [15] :

$$\Psi[x(n)] = x^2(n) - x(n+1)x(n-1). \quad (7)$$

TKEO possède la propriété d'augmenter les fortes discontinuités d'un signal et d'en atténuer les transitions faibles. Par conséquent, il peut être utilisé pour détecter les temps d'arrivée d'un signal large bande. Ainsi, en appliquant TKEO sur les signaux reçus par l'antenne d'hydrophones, on obtient le nombre de sources images N_s ainsi que la collection des $N_s \times N_h$ temps d'arrivée. Même si quelques opérations supplémentaires sont nécessaires pour avoir une détection correcte (filtrage, interpolation, tests d'hypothèses, cf. [5]), cette détection est très rapide.

Le problème de la localisation de la SIVE à partir des temps d'arrivée peut être appréhendé comme un problème de triangulation semblable à celui de la localisation GPS.

Cependant, dans notre cas, les récepteurs sont très proches les uns des autres et l'intersection des différents cercles correspondant aux temps de trajet se fait près de leur point de tangence. Par conséquent, une légère incertitude sur les temps de trajet peut conduire à un grand déplacement du point d'intersection. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé [7] de calculer toutes les intersections deux à deux, puis de prendre la médiane des solutions obtenues. Les résultats obtenus par cette procédure (dénommée MSI-TK par la suite) sont robustes et conduisent à des résultats d'inversion très similaires à ceux obtenus avec l'algorithme MSI-MS mais avec des temps de calcul plus de 10 fois plus faibles. En effet, il n'y a ici pas de cartes à calculer point par point, mais simplement des temps de trajet à estimer puis des intersections à calculer. Notons par ailleurs que la SIVE définie avec cette procédure est très proche de la SIVE obtenue par MSI-MS et que donc les résultats d'inversion sont très proches.

3.3 TKEO - inversion Bayésienne

La dernière méthode de localisation des SIVE utilise les temps de trajet détectés par TKEO tel que décrit dans la section précédente et propose une approche bayésienne du problème de la localisation de la SIVE [16]. L'idée est de chercher la position de la SIVE de la strate i telle que les temps $t^{(i)}$ soient les temps de trajet entre cette position et les hydrophones. Les paramètres à estimer sont donc les coordonnées (x_e, z_e) de la SIVE pour la strate i et le modèle direct est simplement constitué des distances euclidiennes SIVE-hydrophones divisés par c_0 .

L'inversion bayésienne permet de prendre en compte les incertitudes des données et du modèle et de fournir *in fine* une estimation non pas des valeurs des paramètres du problème mais de leur densité de probabilité a posteriori (DDP-AP), permettant ainsi de quantifier la qualité de l'inversion. Cette DDP-AP peut s'écrire de la manière suivante grâce au théorème de Bayes :

$$P(\mathbf{m}|\mathbf{d}) = \frac{P(\mathbf{d}|\mathbf{m})P(\mathbf{m})}{P(\mathbf{d})}, \quad (8)$$

\mathbf{m} étant les paramètres à estimer et \mathbf{d} les données. Une fois les données acquises, la densité de probabilité $P(\mathbf{d}|\mathbf{m})$ peut être interprétée comme la fonction de vraisemblance. Sous l'hypothèse d'incertitudes sur les données indépendantes et gaussiennes, cette fonction peut s'écrire sous la forme suivante :

$$L(x, z) \propto \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_t^2} \sum_{k=1}^{N_h} \left(t_k^{\text{cal}}(x_e, z_e) - t_k^{\text{obs}} \right)^2 \right], \quad (9)$$

où les temps de trajet t_k^{cal} sont issus du modèle direct et t_k^{obs} sont ceux obtenus par TKEO.

La DDP-AP est obtenue par l'algorithme de Metropolis-Hastings (cf. par exemple [17]) qui fournit donc N_{ech} échantillons respectant l'équation 9. La SIVE peut alors être définie à partir de ces échantillons en prenant la médiane des positions et le SSP est finalement estimé à partir de cette SIVE. Mais on peut également estimer le SSP à partir de chacun des échantillons et construire ainsi une DDP-AP du SSP permettant de quantifier les incertitudes sur l'estimation

des paramètres du SSP. Cette méthode est appelée MSI-B dans la suite du texte.

Cette étape d'inversion bayésienne ralentit l'algorithme MSI mais celui-ci reste néanmoins très rapide par rapport à d'autres méthodes d'inversion géoacoustique. En effet, la partie bayésienne de l'inversion porte ici sur la détection d'une position et le modèle direct est extrêmement simple.

4 Résultats

4.1 Inversion de milieux variables en distance

À l'aide d'un système de mesure constitué d'une source et d'une antenne tractées, il est possible de mesurer de nombreux profils de célérités le long d'un trajet. Ainsi, si l'évolution spatiale du milieu géoacoustique est suffisamment lente pour que l'hypothèse de parallélisme des interfaces soit localement acceptable, il est possible de cartographier l'évolution de la structure géologique en fonction de la distance. Cette idée fut appliquée à un jeu de données provenant de la campagne d'expérimentation Clutter'09 conduite par le NURC (NATO Underwater Research Center) en 2009 sur le plateau de Malte [8]. L'équipement utilisé fut un AUV naviguant 12 m au dessus du fond marin et tractant une source et une antenne horizontale de 32 m d'envergure et composée de 32 hydrophones. La vitesse de l'AUV était de 3 nœuds et la source émettait un chirp linéairement modulé en fréquence de 1600 Hz à 3500 Hz pendant 1 s toutes les 3 s. Au total, 2693 profils de célérités furent obtenus à partir de ces mesures le long d'une trajectoire en ligne droite d'environ 13.5 km. La forte variabilité d'un profil à l'autre a imposé l'utilisation d'un filtrage des résultats. Le résultat filtré donne finalement une bonne idée de la structure géologique de la zone étudiée (figure 4).

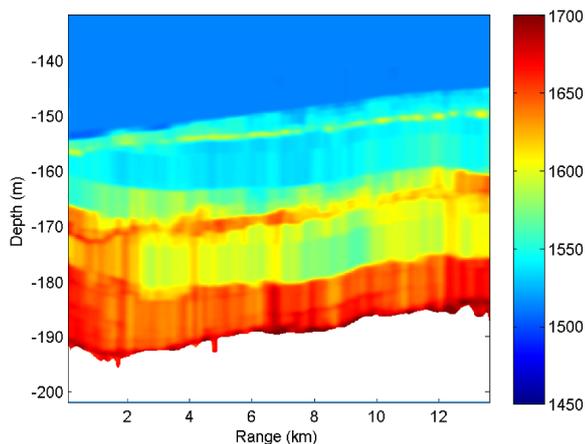


FIGURE 4 – Célérités (en m/s) obtenues à partir de données acquises lors de la campagne de mesure Clutter'09.

4.2 Antenne verticale

La MSI-TK est appliquée sur des données issues de la campagne SCARAB98 [18] menée par le NURC au large de l'île d'Elbe en Italie par 150 m de hauteur d'eau. Les données sont enregistrées sur une antenne verticale composée de 15 hydrophones espacés non régulièrement.

La source émet un signal large bande centré à 2,5 kHz et le fond est assez complexe, constitué de plusieurs strates dont la première présente un fort gradient de vitesse.

La détection des temps d'arrivée des signaux directs, réfléchis fond, et réfléchis surface à l'aide de TKEO permet de connaître de manière précise la position de l'antenne [7]. Par la suite, les temps d'arrivées des échos venant des strates enfouies sont utilisées pour localiser la SIVE par triangulation ou par l'approche bayésienne. Le tableau 1 compare l'inversion fournie par MSI-TK à celle proposée par Holland et Osler [18]. Cette dernière a été validée par comparaison à des mesures de vitesse du son sur une carotte prélevée dans cette zone. On constate un bon accord entre les deux SSP estimés. La strate superficielle n'est pas détectée par TKEO ainsi que la 5^e mais les autres strates présentent des épaisseurs et des vitesses tout à fait comparables pour les deux méthodes d'inversion avec un gain de temps d'inversion très significatif pour la MSI-TK.

Holland & Osler			ISM-TK		
Layer	Depth (m)	Sound speed (m/s)	Layer	Depth (m)	Sound speed (m/s)
1	0.5	1502	...		
2	1.1	1551	I	1.4	1560
3	3.3	1516	II	2.99	1517.9
4	4.8	1527	III	6.44	1526.8
5	5.6	1591	...		
6	15.1	1555	IV	14.19	1542.3

TABLEAU 1 – Résultats de l'inversion des données SCARAB98 par Holland et Osler [18] et par la MSI-TK [7].

Le résultat de l'inversion des données SCARAB98 par la MSI-B est présenté sur la figure 5.

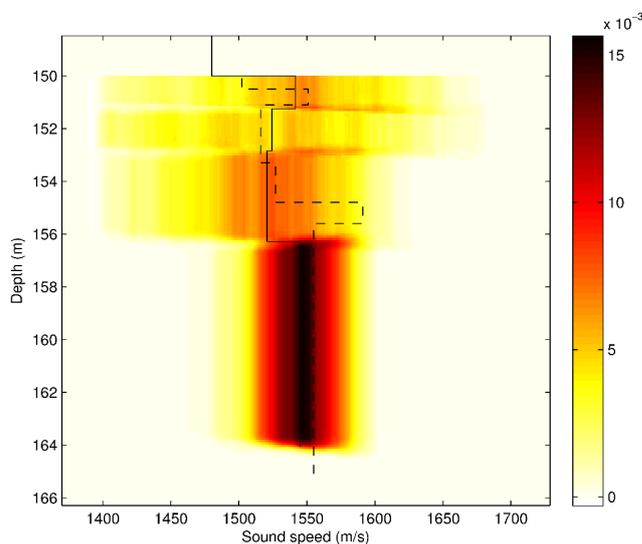


FIGURE 5 – SSP estimés à partir des données SCARAB. La courbe pointillée représente le SSP estimé par Holland et Osler, les couleurs sont les DDP-AP obtenues par MSI-B, et la courbe continue représente le SSP médian fourni par MSI-B.

La MSI-B étant basée sur les temps de trajets détectés par la MSI-TK, on retrouve alors le même nombre de strates dans les deux méthodes. Le SSP médian est très similaire dans les deux cas mais la MSI-B permet de quantifier les incertitudes. Ainsi, celles-ci sont plus fortes sur les strates plus fines (la 1^{ère} et la 2^e) que sur la 5^e strate qui

est plus épaisse. Ce résultat met également en lumière la non-propagation de l'erreur d'inversion vers les strates plus enfouies.

5 Extensions de la MSI

5.1 Strates solides - Densité

D'autres paramètres que le profil de vitesse peuvent également être estimés par la MSI. Le premier est la vitesse des ondes de cisaillement. En effet, même si l'approximation fluide est valable pour la plupart des sédiments superficiels, ils peuvent néanmoins présenter un comportement solide. Dans ce cas, il y a conversion de mode à chaque interface et le signal réfléchi est beaucoup plus complexe. La MSI détecte toutes les réflexions et les sources images correspondant à la conversion de modes permettent une segmentation de ces modes. En effet, la vitesse des ondes de cisaillement étant inférieure à la vitesse des ondes de compression, les sources images associées sont localisées à des endroits différents. Cette étape permet de valider ou non l'hypothèse de fond fluide. Par la suite, l'algorithme d'inversion appliqué à ces résultats fournit une approximation satisfaisante de la vitesse des ondes S. Cette approche a été validée sur des données synthétiques [11, 5]. Le passage à des données réelles est plus compliqué car il est difficile d'avoir de la vérité terrain sur de tels environnements.

La MSI, dans ces différentes versions, n'utilise que les temps d'arrivée des signaux pour estimer le SSP. Si on utilise l'information supplémentaire portée par l'amplitude des signaux réfléchis, il est alors possible d'estimer la densité des strates sédimentaires. L'approche est alors la suivante. La MSI fournit tout d'abord le SSP. Les amplitudes des signaux réfléchis sont ensuite mesurées, puis, grâce à une estimation de l'amplitude du signal émis faite sur le signal direct reçu, on estime les coefficients de réflexion locaux à chaque interface. Connaissant les angles d'incidence et les vitesses du son dans chacune des strates, on peut finalement estimer les densités et les coefficients d'absorption de ces strates. Cette méthode a été appliquée avec succès à des données synthétiques [10] et des données acquises en cuve dans des conditions contrôlées [5]. Le passage aux données réelles est moins concluant, et ce pour deux raisons principales. Premièrement, dans cette approche, le diagramme de directivité de la source n'est pas pris en compte. Or, il affecte l'amplitude du signal émis et, par conséquent, les amplitudes des signaux réfléchis. Deuxièmement, la présence de rugosité, d'hétérogénéités volumiques, ou de strates très fines va peu affecter les temps de trajet des signaux réfléchis mais peut avoir une grande influence sur leurs amplitudes et, par conséquent, fortement biaiser l'estimation de la densité. Néanmoins, les résultats obtenus sont prometteurs et peuvent fournir une première estimation de la densité des strates sédimentaires, première estimation qui pourra servir ensuite de point de départ à des méthodes d'inversion géoacoustique plus performantes.

5.2 Strates non parallèles

L'approximation de strates parallèles peut possiblement être trop restrictive dans certains environnements. Afin de prendre en compte les pendages d'interfaces, la méthode a été modifiée pour prendre en compte l'évolution de la

position des sources images en fonction de la position horizontale du système de mesure [12]. La figure 6a montre la célérité d'un environnement dans lequel a été simulé un AUV effectuant 200 mesures le long de l'horizontale. La figure 6b montre les 200 profils de célérités obtenus en supposant des interfaces parallèles et la figure 6c montre les profils obtenus par la méthode améliorée.

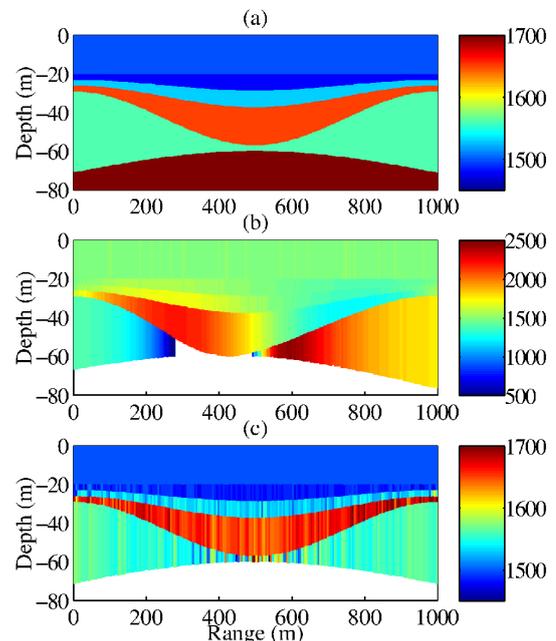


FIGURE 6 – (a) Célérités (en m/s) du domaine de simulation. (b) Profils de célérités calculés en supposant des interfaces parallèles. (c) Profils de célérités en incluant l'évolution des positions des sources images dans le calcul.

5.3 Détection d'objets enfouis

Les sources images étant liées à une détection d'interfaces planes, l'influence de ces dernières sur le signal enregistré est alors connue. Il est donc possible de soustraire les échos d'interfaces du signal [13]. Les échos d'interfaces étant généralement les plus importants dans le signal, une imagerie avec les signaux "nettoyés" de ces échos accroît considérablement le contraste des objets diffusant, de la diffusion par la rugosité surfacique ou bien encore la diffusion par les hétérogénéités volumiques. La figure 7 montre une imagerie d'un milieu stratifié simulé dans lequel ont été positionnés des diffuseurs avant et après le filtrage des réflexions d'interfaces. La raison fondamentale expliquant que la soustraction des réflexions d'interfaces n'a pas éliminé les diffuseurs vient du fait que le front d'onde sphérique est émit en $t = 0$ pour les sources images alors que l'onde sphérique d'un diffuseur ponctuel est émise au moment où l'onde provenant de la source atteint ce diffuseur.

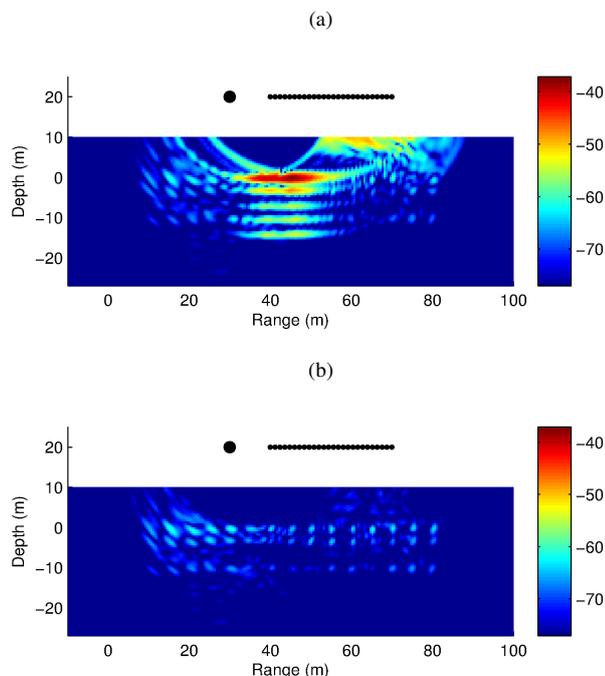


FIGURE 7 – (a) Imagerie d'un milieu stratifié. Le point noir épais représente la position de la source et les autres points noirs représentent les positions des hydrophones. (b) Imagerie du milieu après filtrage des réflexions d'interfaces.

6 Conclusions

Cet article présente une synthèse de la MSI, méthode d'inversion géoacoustique récemment développée. Par rapport aux autres méthodes (cf. par exemple [3] et les références incluses), le modèle direct est très simple et, grâce à une réduction drastique du nombre de données à inverser, fournit au final un algorithme rapide et précis. La clé de la MSI réside dans la capacité à localiser les sources images virtuelles équivalentes à partir des signaux enregistrés par une antenne d'hydrophones. Plusieurs algorithmes ont été développés à ce sujet, basés soit sur des méthodes d'antennerie (MSI-MS), soit sur la détection des temps d'arrivée (MSI-TK et MSI-B). Les performances atteintes par ces différentes sont similaires et ont fourni de très bons résultats sur des données acquises en mer. Un point important est que la MSI fournit une estimation locale du SSP et que l'on peut par conséquent obtenir une inversion du milieu sédimentaire dans des environnements variables en distance par répétition de la méthode. Les différentes extensions présentées dans cet article (estimation d'autres paramètres, prise en compte du pendage, détection d'objets enfouis) montrent également que la MSI peut être un outil très performant pour diverses applications d'inversion géoacoustiques.

Références

[1] X. Lurton. *An introduction to underwater acoustics*. Springer, 2 edition, 2010.

[2] D.R. Jackson and M.D. Richardson. *High-frequency seafloor acoustics*. Springer, 2007.

[3] Alex Tolstoy, editor. *Important elements in : geoacoustic inversion, signal processing, and*

reverberation in underwater acoustics. Research Signpost, 2008.

- [4] S. Pinson. *Caractérisation des fonds marins par la méthode des sources images*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, 2011.
- [5] A. Drira. *Inversion géoacoustique : amélioration et extension de la méthode des sources images*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, 2015.
- [6] S. Pinson and L. Guillon. Sound speed profile characterization by the image source method. *J. Acoust. Soc. Am.*, 128(4) :1685–1693, 2010.
- [7] A. Drira, L. Guillon, and A. O. Boudraa. Image source detection for geoacoustic inversion by the teager-kaiser energy operator. *J. Acoust. Soc. Am. Express Letter*, pages EL258–EL264, 2014.
- [8] S. Pinson, L. Guillon, and C.W. Holland. Range dependent sediment sound speed profile measurements using the image source method. *J. Acoust. Soc. Am.*, 134(1) :156–165, 2013.
- [9] A. Drira, A. O. Boudraa, L. Guillon, and A. Komaty. On the estimation of time-delays for image source method. In *23rd European Signal Processing Conference*, Nice, France, 2015.
- [10] A. Drira, L. Guillon, and A. O. Boudraa. On the inversion of sediment density profile by the image source method. In *167th meeting of the Acoustical Society of America*, Providence, RI, USA, 2014.
- [11] L. Guillon, S. Pinson., and A. Drira. Geoacoustic inversion of stratified seafloor with elastic layers by the image source method. In *11th European conference on Underwater Acoustics*, 2012.
- [12] S. Pinson and C. W. Holland. Seafloor sound-speed profile and interface dip angle characterization by the image source method. *J. Acoust. Soc. Am.*, 136(2) :596–603, 2014.
- [13] S. Pinson and C. W. Holland. Layer filtering for seafloor scatterers imaging. *J. Acoust. Soc. Am. Express Letter*, 137(5) :EL 355 – EL 359, 2015.
- [14] A. Tarantola. *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*. SIAM, 2005.
- [15] A. O. Boudraa, J.C. Cexus, and K. Abed-Meraim. Cross-psi-energy operator-based signal detection. *J. Acoust. Soc. Am.*, 132 :4283–4289, 2008.
- [16] L. Guillon, S. E. Dosso, and N. R. Chapman. Bayesian geoacoustic inversion with the image source method. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2016. Accepted for publication.
- [17] K. Mosegaard and A. Tarantola. Probabilistic approach to inverse problems. In *International handbook of earthquake and engineering technology*. Academic press, 2002.
- [18] C.W. Holland and J. Osler. High-resolution geoacoustic inversion in shallow water : A joint time- and frequency-domain technique. *J. Acoust. Soc. Am.*, 107(3) :1263–1279, 2000.