

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Détection et localisation 3D de cibles en environnement réverbérant à l'aide de la méthode DORT

D. Clorennec¹, C. Prada¹, F.D. Philippe¹, E. Cochard¹, J. de Rosny¹, S. Tauvry², P. Billand², M. Fink¹

¹ Institut Langevin, laboratoire Ondes et acoustique, Université Paris 7- CNRS- ESPCI, 10, rue Vauquelin, 75231 Paris Cedex 05- France

² Altran Ouest, Atlantide, Technopôle Brest Iroise, 29200, Brest

Lors du projet DOREV, nous avons déployé par 15m de fond un réseau vertical de 24 transducteurs fonctionnant à 12 kHz. Nous avons alors démontré l'intérêt de la méthode DORT pour séparer l'écho d'une cible de la réverbération et pour dissocier les échos de cibles proches grâce aux trajets multiples dans le guide d'onde. Lors du projet REICIF nous avons déployé les 24 transducteurs en deux sous-réseaux distants de 1,4 m dans le bassin 16 du GESMA à Brest afin de détecter diverses cibles. Ces expériences ont mis en évidence la capacité de la méthode à détecter une cible de taille inférieure à la longueur d'onde à plus de 600 longueurs d'onde du réseau. Dans ce bassin d'essais, le contrôle des conditions expérimentales nous a permis d'analyser le potentiel de la méthode DORT pour localiser une cible soit sur le fond soit en surface. De plus, en interpolant le champ de pression calculé en utilisant le code de repropagation numérique RAM pour chaque sous-réseau nous avons pu obtenir une localisation 3D des cibles. Dans un guide d'onde, la construction du vecteur propre temporel associé à la cible fait appel à la méthode « S.V.P. » (Synchronisation du Vecteur Propre) qui corrige à chaque fréquence l'erreur de phase induite par la décomposition en valeurs singulières. Après détection de la cible, il est alors possible de focaliser spatialement et temporellement sur celle-ci et ainsi d'augmenter l'écho de cible.

1 Introduction

La focalisation acoustique par renversement temporel à l'aide d'un réseau d'émetteurs/récepteurs (SRA : source receiver array) a été démontrée en acoustique sous-marine [1]. La méthode de décomposition de l'opérateur de retournement temporel (DORT) a été appliquée en milieu inhomogène pour détecter simultanément plusieurs cibles et focaliser sélectivement sur chacune d'elles. Cette méthode a notamment été utilisée dans un guide d'onde ultrasonore ayant un fond plan rigide [2] [3]. La méthode DORT a été testée avec succès lors du projet DOREV à la fréquence de 12 kHz et a démontré sa capacité à séparer deux cibles proches en tirant profit des réflexions multiples aux interfaces afin d'augmenter la résolution spatiale. Ces essais ont également permis de séparer l'écho de cible de la réverbération[5].

Lors du projet REICIF, nous avons déployé les 24 transducteurs en deux sous-réseaux dans le bassin 16 du GESMA à Brest. Dans cet environnement contrôlé, nous avons pu détecter une cible inférieure à la longueur d'onde en profitant de la stabilité du bassin pour réaliser une soustraction des signaux. La détection et la localisation d'une cible proche des interfaces permet d'étudier l'influence des trajets réfléchis. La méthode de synchronisation du vecteur propre permet de focaliser spatialement et temporellement de manière active.

2 Dispositif expérimental

Le réseau acoustique, déployé à partir d'une extrémité du bassin, se compose d'une armature rigide de soutien comportant 24 émetteurs / récepteurs (SRA : source

receiver array) fonctionnant dans la bande de fréquence 11 à 14 KHz avec un niveau maximum de source de 203dB pour 1μPa@1m. Les capteurs sont répartis en quinconce sur deux sous-réseaux espacés de 1.4m. La distance entre deux capteurs sur un sous-réseau est de 0.7m (Figure 1). Chacun des 24 canaux est commandé et amplifié individuellement pendant la transmission et la réception des données.

En outre, une antenne verticale de 24 hydrophones (VRA : vertical receiver array), déployée à partir d'une passerelle motorisée, est employée pour contrôler le champ acoustique produit par le SRA. La distance entre deux hydrophones est de 0.2m.

Le bassin 16 du GESMA à Brest a une longueur de 80m, une largeur de 11m et une hauteur d'eau constante de 8.45m. De plus le bassin comporte trois bacs à sédiments juxtaposés à la distance de 46m du réseau acoustique pour une longueur totale de 25m et une largeur de 5m. La hauteur des deux premiers bacs est de 0.8m (Figure 2).



Figure 1: réseau acoustique et vue du bassin 16 du GESMA

Diverses cibles, mises à notre disposition par le GESMA, ont été immergées à différentes positions dans le guide d'onde.

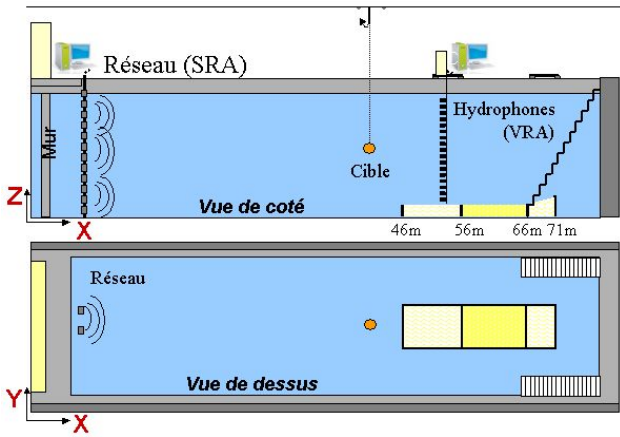


Figure 2: configuration expérimentale : vues de coté et dessus

3 Expériences

La méthode de DORT déjà décrite dans plusieurs articles [1] - [3], se résume comme suit. Après mesure de la matrice des réponses impulsionnelles inter-éléments du réseau $K(t)$, les matrices $K_{to}(\omega)$ sont calculées par transformée de Fourier de $K([to, to+\Delta t])$. Le temps to correspond à une distance d'observation $to/2c$ (c étant la vitesse du son dans l'eau) et la durée Δt est ajustée selon le niveau de réverbération du fond et du temps de réverbération de la cible. La décomposition en valeurs singulières des matrices $K_{to}(\omega)$ est calculée pour des fréquences choisies. Lors de nos expériences, nous avons utilisé une fenêtre temporelle de durée $\Delta t = 1\text{ms}$. L'analyse des valeurs singulières et des vecteurs singuliers de $K_{to}(\omega)$ fournit des informations pertinentes sur le milieu. Le calcul est effectué pour des valeurs de to régulièrement espacées et les valeurs singulières sont alors représentées en fonction de la distance $to/2c$. Afin de localiser la cible, nous calculons la rétro-propagation numérique des vecteurs singuliers en espace libre, évitant ainsi les difficultés liées à la méconnaissance du milieu. Plus précisément, pour chaque temps to , nous calculons la décomposition en valeurs singulières de $K_{to}(\omega)$ et propageons le premier vecteur propre à la distance $to/2c$. En juxtaposant les lignes obtenues pour chaque temps to , on obtient une image intéressante du milieu. En connaissant les propriétés géométriques du guide d'onde nous pouvons utiliser le code de repropagation RAM [6] qui permet de tirer profit des réflexions pour améliorer la résolution spatiale.

3.1 Détection d'une cible

Une cible sphérique creuse remplie de diamètre 20cm est placée à 57m du réseau et à 4,5m sous la surface. Afin de mesurer la matrice des réponses impulsionnelles $K(t)$, des signaux LFM de 10ms sont émis successivement par les 24 transducteurs. Pour l'analyse, une fenêtre temporelle de 1 ms est décalée par pas de 0,25 ms. Pour chaque fenêtre temporelle, la matrice $K(\omega)$ est calculée de 9 à 16 kHz par pas de 0.2kHz.

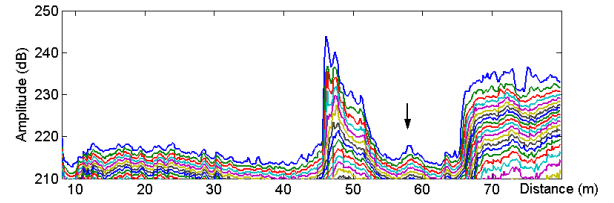


Figure 3 : Valeurs singulières en fonction de la distance

La Figure 3 montre l'évolution des valeurs singulières en fonction de la distance. Le niveau de réverbération du fond est de l'ordre de 215dB. Un premier pic à 46m correspond à la face avant du premier bac à sédiment, la remontée à partir de 66m correspond aux escaliers et au dernier bac à sédiment incliné. A 57m du réseau, la valeur singulière de cible émerge de la réverbération de 3dB (flèche verticale sur la figure).

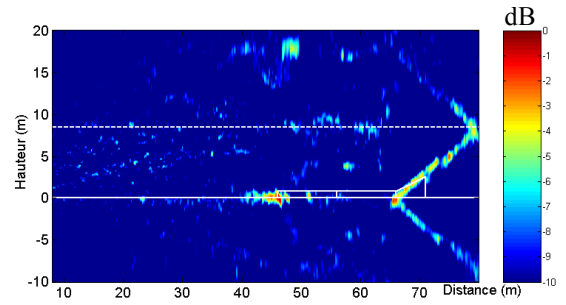


Figure 4 : Rétro-propagation numérique en espace libre du premier vecteur singulier obtenue pour une fenêtre temporelle glissante

La rétro-propagation en espace libre du premier vecteur propre en fonction de la distance (Figure 4) montre une forte localisation d'énergie au niveau de la face avant du premier bac à sédiment et son image par rapport à la surface. Les traits blancs représentent les interfaces horizontales du guide d'onde. De la même manière, les escaliers et leurs images par rapport aux deux interfaces apparaissent nettement. L'énergie provenant de la cible à 57m est localisée à 4m par rapport au fond, la figure met en évidence une image par rapport au fond (-4m).

Grâce au dédoublement du réseau, nous obtenons une information sur l'azimut de la cible ($Y=0$). Le faible échantillonnage dans cette dimension entraîne la présence de forts lobes de réseaux. Les images de la cible par rapport aux parois verticales sont fortement altérées par ces lobes.

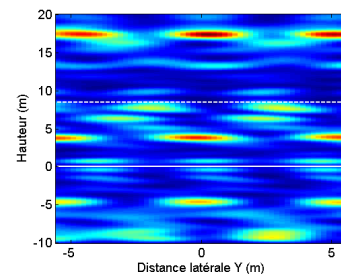


Figure 5: Coupe dans le plan latéral à la distance 57m

En introduisant les paramètres du guide d'onde dans le code de repropagation numérique RAM, nous obtenons une localisation de la cible dans le plan XZ en tenant compte des réflexions aux interfaces. La Figure 6 montre la localisation de la cible à 57 m et 4m par rapport au fond. La

coupe à 57 m montre un gain en résolution d'un facteur deux (0.4 m à -6dB).

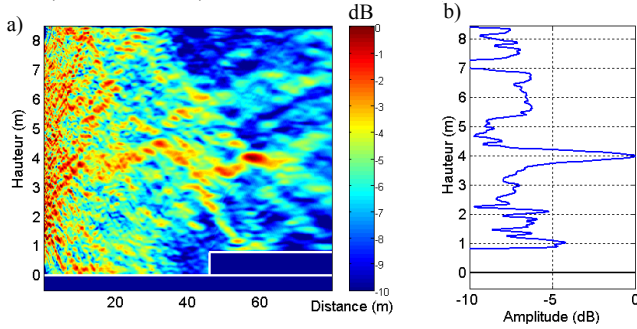


Figure 6: a) Rétro-propagation du premier vecteur singulier avec le code RAM, b) coupe à 57m

3.2 Détection d'une cible inférieure à la longueur d'onde

Une nouvelle expérience est effectuée avec une cible sphérique creuse de diamètre 7.5cm placée à 57m du réseau et à 1m sous la surface. La taille de la cible est inférieure à la longueur d'onde.

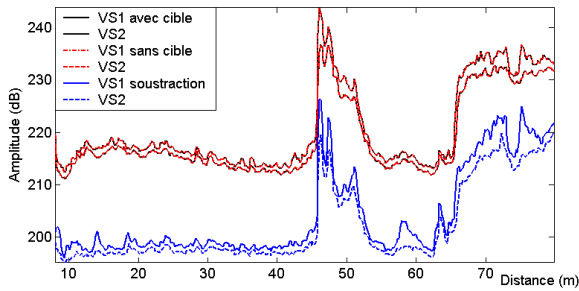


Figure 7: Détection d'une petite cible à 57m: les deux premières valeurs singulières en fonction de la distance de la matrice mesurée avec la cible (en noir), sans la cible (en rouge), après soustraction d'une matrice de référence $K(t)$ (en bleu)

La Figure 7 montre l'évolution des deux premières valeurs singulières en fonction de la distance. Cette cible étant petite devant la longueur d'onde, les valeurs singulières des matrices avec et sans cible (courbes rouges et noires) apparaissent identiques. La stabilité du milieu autorise la soustraction des matrices $K(t)$ avant le traitement DORT, nous observons alors que la première valeur singulière (courbe bleue) se détache de 6dB de la suivante à 57m.

En rétro-propageant le premier vecteur singulier à la distance correspondant à chaque fenêtre temporelle traitée, nous observons la cible à 57m et son image par rapport à la surface (Figure 8). La focalisation à 66m au milieu du guide correspond à la position du réseau d'hydrophones.

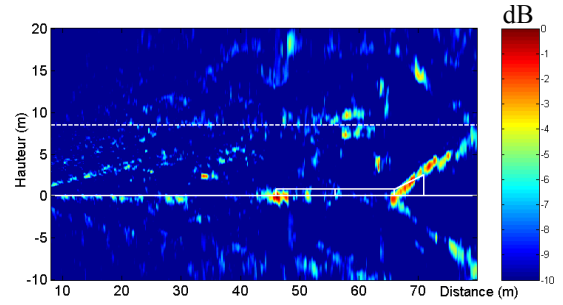


Figure 8 : Rétro-propagation numérique en espace libre du premier vecteur singulier obtenue pour une fenêtre temporelle glissante

Le code de repropagation numérique RAM permet pour la fenêtre temporelle associant l'écho de la cible d'obtenir la localisation de la cible en tirant profit des réflexions aux interfaces. Nous retrouvons la cible située à 1m par rapport à la surface avec une largeur à -6dB de 0.4m.

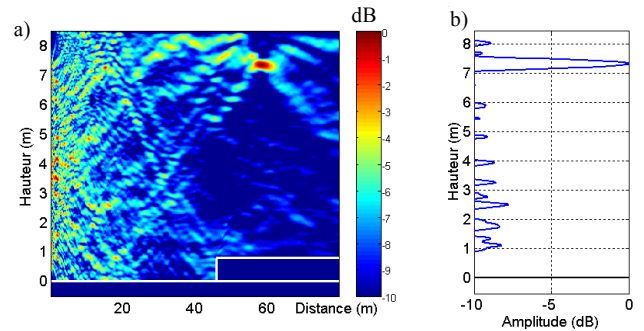


Figure 9 : Rétro-propagation à l'aide du code RAM du 1er vecteur propre.

3.3 Cible proche d'une interface

Les techniques conventionnelles ne tirent pas profit des réflexions aux interfaces. Dans les expériences suivantes nous nous intéressons aux configurations où un trajet réfléchi peut contenir l'information de la cible.

Dans une première expérience, la cible sphérique de diamètre 20cm est mi-immersée à 58m du réseau. La rétro-propagation en espace libre montre à 58m une localisation de l'énergie de la cible à la surface et une forte composante sur l'image par rapport au fond (Figure 10).

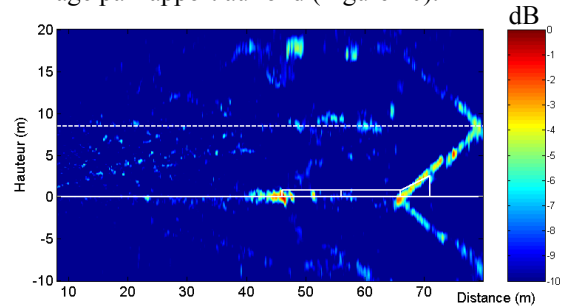


Figure 10: Rétro-propagation numérique en espace libre du premier vecteur singulier

La rétro-propagation à l'aide du code RAM montre une bonne qualité de focalisation de l'énergie à 58m à proximité de la surface. Nous constatons que le trajet comportant une réflexion au fond est prédominant.

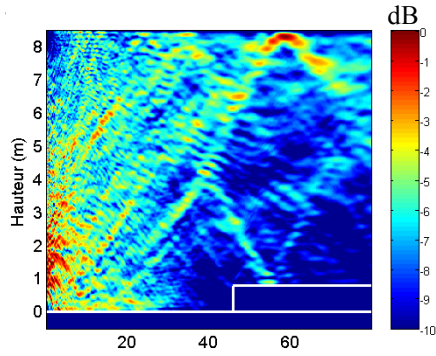


Figure 11: Rétro-propagation à l'aide du code RAM du 1er vecteur propre

Dans une seconde expérience, un cône tronqué de diamètre 1m à la base et de hauteur 0.4m est posée sur le deuxième bac à sédiment à la distance 55m.   cette distance, la rétro-propagation en espace libre montre un maximum d'énergie sur l'image par rapport à la surface.

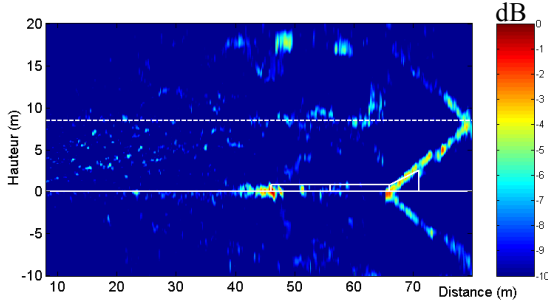


Figure 12 : Rétro-propagation numérique en espace libre du premier vecteur singulier

La repropagation avec le code RAM confirme l'importance du trajet réfléchi à la surface (Figure 13). Le maximum de focalisation est obtenu à 55m et 1.2m par rapport au fond. Cette hauteur correspond à l'arête supérieure du cône.

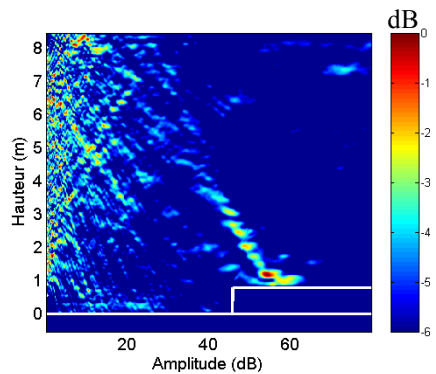


Figure 13: Rétro-propagation à l'aide du code RAM du 1er vecteur propre

Ces deux exemples démontrent l'importance des trajets indirects pour détecter et localiser une cible proche des interfaces. Par définition, la méthode DORT exploite ces trajets multiples pour détecter et localiser ces cibles dans des positions limites.

3.4 Renforcement de l'écho de cible par focalisation active

En présence de trajets multiples, une simple transformée de Fourier inverse ne permet pas de calculer le vecteur propre temporel permettant de focaliser spatialement et temporellement sur une cible. Nous avons proposé une méthode de synchronisation des vecteurs propres utilisant la repropagation de ces vecteurs en espace libre afin de lever l'indétermination de phase induite par la SVD à chaque fréquence par annulation de la phase au point focal [7].

Dans cette exemple, la cible sphérique de diamètre 20cm est à 36m du réseau à la hauteur 5.5m du fond. Après traitement DORT de 9 à 16 kHz, le premier vecteur propre est repropag  en espace libre en fonction de la distance (Figure 14). L'énergie focalise sur la cible à 36m   5.5m du fond et sur les images à -5.5 et 12m. La correction de phase pour chaque fréquence est faite en annulant la phase au point focal (36m, 5.5m). Ensuite, la transformée de Fourier inverse fournit le signal temporel à émettre du réseau pour focaliser sur la cible (Figure 15). Le front d'onde direct et les deux fronts associés aux réflexions sur les deux interfaces horizontales du guide d'onde sont bien observés, laissant espérer un gain en résolution d'un facteur trois.

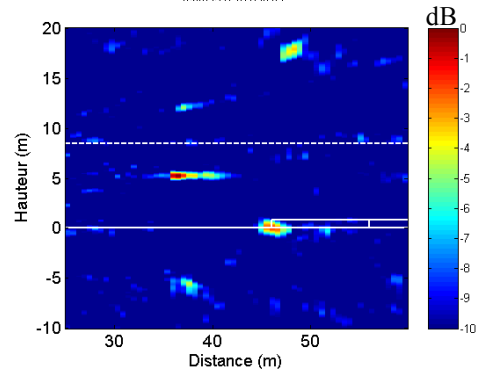


Figure 14: Rétro-propagation numérique en espace libre du premier vecteur singulier

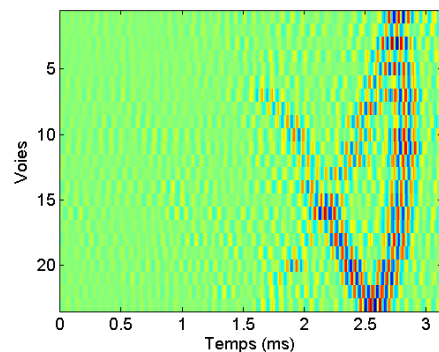


Figure 15: Vecteur propre temporel calculé par la méthode « SVP »

Ce signal temporel est émis toujours en présence de la cible. L'écho reçu sur le réseau est comparé à l'écho après l'émission d'une onde plane. Sur la Figure 16, un gain de 10dB sur l'écho de la cible est observé tandis que l'énergie provenant du fond et du bac à sédiment n'est pas amplifiée.

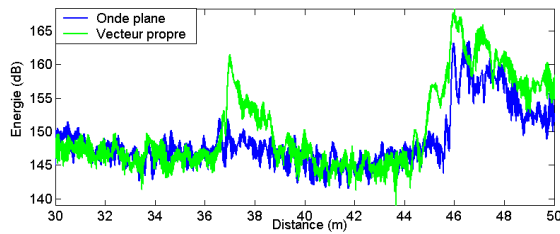


Figure 16 : Renforcement de l'écho de cible après émission du vecteur propre ; Comparaison à l'émission d'une onde plane

Pour vérifier le gain en résolution spatial, nous avons déployé l'antenne d'hydrophones à la distance de la cible. Nous avons mesuré le champ après émission d'une loi focale cylindrique calculée pour focaliser sur la cible et après émission du vecteur propre temporel. Nous retrouvons le gain en résolution d'un facteur 3 ainsi qu'un gain en dynamique.

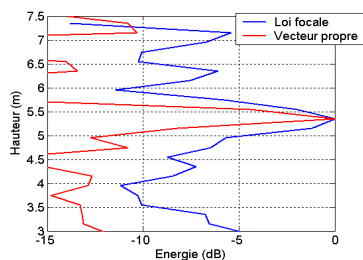


Figure 17: Energie mesurée sur l'antenne d'hydrophones à 36m après émission d'une loi focale et du vecteur propre.

3.5 Détection d'une cible enfouie

Les bacs à sédiments contiennent des cibles de différentes formes et tailles à différentes profondeurs. Dans les expériences précédentes, nous avons constaté qu'à l'étalement de la réponse de la face avant du bac à sédiment à 46m venait s'ajouter une seconde information à la distance de 51.3m. A cette distance, la rétro-propagation en espace libre montre une localisation de l'énergie à l'intérieur du bac à sédiment (Figure 18). Une carte précise de l'emplacement des cibles nous indiquent la présence à cette distance d'un cylindre de diamètre 0.55m de longueur 2m placé perpendiculairement à l'axe de propagation, désaxé de 0.5m vers la droite selon l'axe Y et situé à 0.4m du fond.

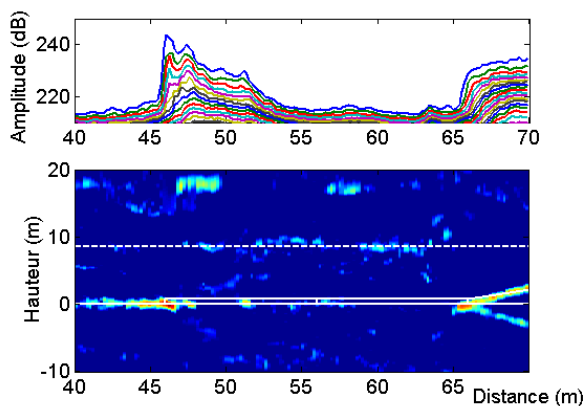


Figure 18: valeurs singulières et rétro-propagation du 1er vecteur propre en fonction de la distance.

Nous utilisons le code RAM pour réaliser une image du bassin et discriminer l'information provenant de la face

avant du bac de la cible enfouie identiquement à la méthode employée pour réaliser la rétro-propagation en espace libre : un temps est équivalent à une distance donc à un champ de pression.

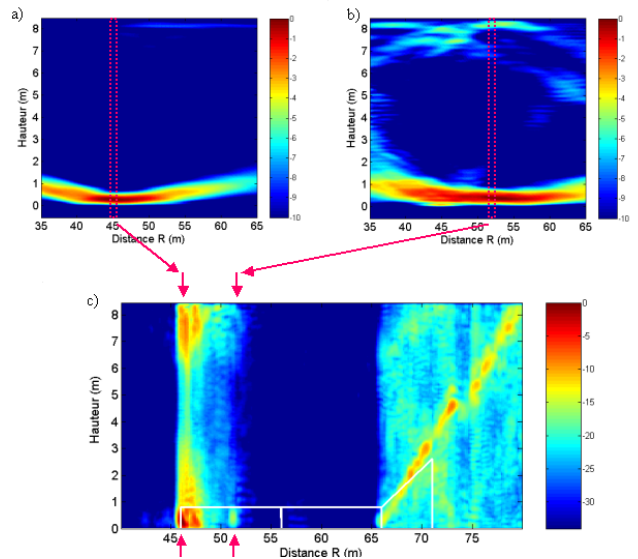


Figure 19 : repropagation avec code RAM a) face avant bac à sédiment b) cible enfouie c) fenêtre glissante

Les Figure 19-a et b montrent la focalisation du signal temporel correspondant respectivement à la distance 46m et 51.5m. Après itération du code RAM pour chaque distance, nous obtenons une coupe du champ pour chaque distance qui permet de s'affranchir de la diffraction axiale. la Figure 19-c est l'image finale après juxtaposition de toutes les coupes du code RAM. Nous observons une focalisation de l'énergie à la distance 51.5m à 0.4m par rapport au fond.

Nous avons également développé une nouvelle méthode d'imagerie en 3 dimensions pour avoir accès à un maximum d'informations sur la zone du bassin. Cette méthode s'appuie sur les deux techniques précédemment citées : la repropagation en espace libre et la repropagation par le code RAM. En effet, l'imagerie RAM nous permet de calculer les deux champs de pression dans le plan sagittal XZ en face de chaque sous-réseau. Le champ de pression 3D est calculé par interpolation de ces deux champs par repropagation en espace libre horizontalement. Ainsi cette méthode permet de bénéficier de l'augmentation de résolution due aux réflexions sur le fond et à la surface tout en limitant le coût en temps de calcul. L'ouverture du réseau suivant l'axe horizontal induit une faible résolution et le faible échantillonnage spatial en nombre de transducteurs suivant cette dimension induit des lobes de réseau intenses et proches. La Figure 20 est la coupe dans le plan transverse (XY) à la hauteur 0,4 m par rapport au fond. Nous observons nettement une tâche de focalisation à l'intérieur du bac à une position voisine de la position de la cible.

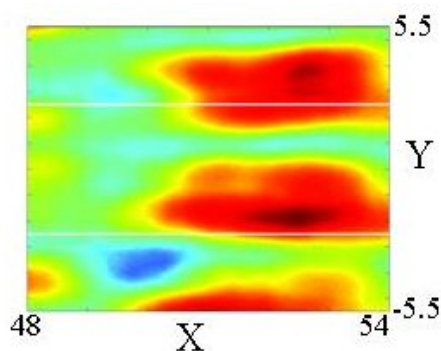


Figure 20 : Coupe dans le plan XY au niveau du bac à sédiment N°1 à la hauteur $Z = 0.4\text{m}$ /fond (échelle linéaire)

Toutefois ces résultats n'ont pu être confirmés par une expérience en l'absence de ces cibles enfouies.

4 Conclusion

Des expériences de détection acoustique utilisant la méthode de DORT ont été appliquées sur des données mesurées avec un réseau émetteur / récepteur vertical de 2×12 éléments fonctionnant dans la bande de fréquence 11-14 KHz. Les expériences ont été menées dans un bassin de 80m de longueur. Les expériences ont été limitées par les dimensions du bassin, un fort temps de réverbération et des parois verticales induisant de forts lobes de réseaux du fait du faible échantillonnage spatial dans cette dimension.

Dans cet environnement, la méthode DORT a démontré la possibilité de détecter et de localiser une cible dans les trois dimensions dans le guide d'ondes. En utilisant la stabilité du milieu de propagation, nous avons pu détecter une cible inférieure à la longueur d'onde. La méthode a également permis de mettre en évidence la prédominance des trajets réfléchis lorsqu'une cible est placée au niveau des interfaces du guide d'ondes. Une expérience de focalisation active a été menée par émission du premier vecteur propre temporel calculé à partir de la méthode « SVP ». L'énergie focalise à la position de la cible et laisse apparaître une tache focale fortement localisée en profitant des réflexions multiples aux interfaces. Cette localisation de l'énergie permet un renforcement de l'écho de cible. Dans une dernière partie, nous avons analysé les échos provenant des bacs à sédiments. En combinant la rétro-propagation en espace libre et le code RAM, nous avons obtenu une localisation 3D d'un cylindre enfoui à 51.5m du réseau et 0.4m sous la surface du sédiment.

Ces travaux ont été menés dans le cadre du contrat 07.34.039 financé par la DGA/MRIS

Références

- [1] Kuperman W.A., Hodgkiss W.S., Song H.C., et al. "Phase conjugation in the ocean: Experimental demonstration of an acoustic time-reversal mirror", J. Acoust. Soc. Am. 103 (1): 25-40 (1998).
- [2] Mordant N., Prada C. and Fink M., "Highly resolved detection and selective focusing in a waveguide

using the D.O.R.T. method", J. Acoust. Soc. Am. 105, 2634-2642 (1999).

- [3] Folégot T., Prada C. and Fink M., "Resolution enhancement and separation of reverberation from target echo with the time reversal operator decomposition", J. Acoust. Soc. Am. 113 (6), pp 3155-3160 (2003).
- [4] Gaumond C.F., Fromm D.M., Lingeitch J.F., Menis R., Edelmann G.F., Calvo D.C., and Kim E; "Demonstration at sea of the decomposition-of-the-time-reversal-operator technique", J. Acoust. Soc. Am. 119, 976 (2006).
- [5] C. Prada, J. De Rosny, D. Clorennec, J.G. Minonzio, A. Aubry, M. Fink, L. Bernière, S. Hibrat, P. Billand, T. Folégot, "Experimental detection and focusing in shallow water by decomposition of the Time Reversal Operator", J. Acoust. Soc. Am., Vol.122, pp. 761-768, Aout 2007
- [6] Collins, M. D., and Westwood, E. K. (1991). "A higher-order energyconserving parabolic equation for range-dependent ocean depth, sound speed, and density," J. Acoust. Soc. Am. 89, 1068–1075
- [7] F. D. Philippe, C. Prada, D. Clorennec, T. Folégot, M. Fink, " Construction of the temporal invariants of the time-reversal operator", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 126 (1), pp. EL8–EL13, July 2009