

Imagerie Multistatique Pour Le Sonar Passif

Caroline Hervé ¹, Jean-Pierre Sessarego ¹, Régine Guillermin ¹,
Françoise Schmitt ², Franck Daout ²

¹ *Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, 13402 Marseille, France, courriel : herve@lma.cnrs-mrs.fr*

² *Groupe d'Electromagnétisme Appliqué, Université de Paris X, France, courriel : fschmitt@u-paris10.fr*

Résumé

Le but de cette étude est de transposer l'algorithme de rétro-projection utilisé en imagerie radar bistatique [1] au cas de l'imagerie sonar multistatique [2]. Cet algorithme, proposé par le Groupe d'Electromagnétisme Appliqué, a été appliqué à des mesures expérimentales réalisées en cuve au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique. L'utilisation de cibles canoniques telles que les cylindres a permis d'obtenir des simulations pour valider l'expérience. Les images obtenues sont examinées dans le but de tester l'algorithme de manière qualitative dans la configuration multistatique et de mieux l'adapter au cas du sonar. L'interprétation de ces images montre que les simulations et les mesures donnent des résultats similaires. Le système sonar multistatique permet de détecter les cibles présentes dans la zone imagée et également de séparer visuellement des cibles proches ($D/\lambda \approx 1.67$ avec D la distance entre les cibles). Par contre, la présence de nombreux lobes sur les images reconstruites entraîne des problèmes de localisation. L'analyse des résultats montre que l'algorithme de rétro-projection doit être adapté pour prendre en compte la nature physique des cibles.

Introduction

Le Sonar à Ouverture Synthétique est un système de détection, de localisation et de classification de cibles en Acoustique Sous-Marine [3][4]. Ce système permet d'obtenir des images ayant une meilleure résolution qu'avec un sonar classique. L'amélioration de la résolution est due au fait que l'on augmente l'ouverture de l'antenne en utilisant son déplacement. En sommant de façon cohérente les signaux reçus pour les différentes positions de l'antenne, on obtient une image avec plus d'informations sur la cible qu'avec un seul signal écho. Ce système est actuellement opérationnel dans la configuration monostatique (émetteur et récepteur sur le même porteur) [5]. L'inconvénient de cette configuration est que le sonar y est actif, donc facilement détectable. Pour rendre ce système plus discret, nous nous sommes intéressés à la configuration multistatique qui permet d'utiliser des sources d'opportunité, les émetteurs et les récepteurs n'étant pas liés [2]. Le scénario, en acoustique sous-marine pourrait être le suivant : cf. Figure 1.

Dans une première étude, des hypothèses sont faites pour simplifier le problème afin de tester l'algorithme de rétro-projection. Ces hypothèses sont les suivantes : l'émission est maîtrisée (la source et le signal qu'elle émet sont connus), on est en champ libre, les cibles sont bidimensionnelles, les positions exactes des récepteurs sont connues,

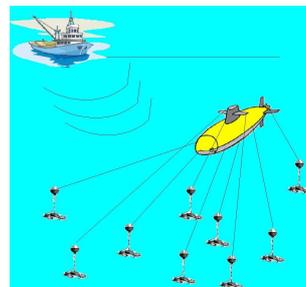


Figure 1: Scénario en acoustique sous-marine

et, on est en champ lointain.

La première partie décrit le principe du processeur d'images. La deuxième partie propose les paramètres expérimentaux et de simulation. Ensuite, on voit comment les données synthétiques et expérimentales sont générées. Enfin, les images reconstruites par le processeur d'images pour les deux types de données sont commentées et des perspectives pour la suite de l'étude sont proposées.

Processeur d'images

Géométrie du système multistatique

La Figure 2 représente la géométrie générale de la configuration multistatique où un seul récepteur est représenté pour des raisons de clarté. Dans toute la suite, les angles sont donnés par rapport à l'axe ($0x$) et la distance r est donnée par rapport au centre du repère.

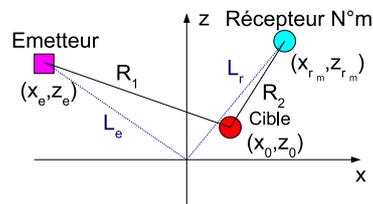


Figure 2: Géométrie du système multistatique

Avec R_1 et R_2 , respectivement les distance cible-émetteur et cible-récepteur :

$$R_1(x_0, z_0) = \sqrt{(x_e - x_0)^2 + (z_e - z_0)^2} \quad (1)$$

$$R_2(x_0, z_0) = \sqrt{(x_r - x_0)^2 + (z_r - z_0)^2} \quad (2)$$

Hypothèses

On modélise la réponse de l'objet comme une somme de points brillants. On suppose que les diagrammes d'antennes sont isotropes et ne varient pas avec la fréquence et que le signal émis est une impulsion.

Algorithme de rétro-projection

Cet algorithme temporel reconstruit l'image pixel par pixel en sommant de façon cohérente les différents signaux reçus.

L'intensité d'un pixel de l'image est donnée par la somme sur tous les récepteurs de la convolution entre le signal reçu $s(t)$ et la réponse $\delta(t)$ d'un point brillant situé sur le pixel concerné. On obtient, pour l'intensité du pixel (x, z) , la formule suivante [2] :

$$I(x, z) = \sum_m \sum_n s(t_n, \theta_m) \delta(t_n - \Delta\tau_m(x, z)) \quad (3)$$

Où $\tau_m(x, z) = \frac{R_1(x, z) + R_2(x, z, \theta_m)}{c_0}$ avec n l'échantillon de temps, m celui de la position de réception (r_m, θ_m) et c_0 la célérité du son dans l'eau.

On a donc

$$I(x, z) = \sum_m \sum_n s(t_n - \Delta\tau_m(x, y)) \quad (4)$$

Paramètres expérimentaux et de simulation

Dans cette partie on décrit la géométrie du système imageur, le signal émis et les cibles utilisées. On choisit des cibles canoniques c'est à dire dont le champ diffracté a une forme analytique.

Disposition des transducteurs

On dispose de 3 positions d'émission différentes et de 65 positions de réception (cf. Figure 3). L'acquisition des données est faite sur 65 récepteurs pour chacune des positions d'émission.

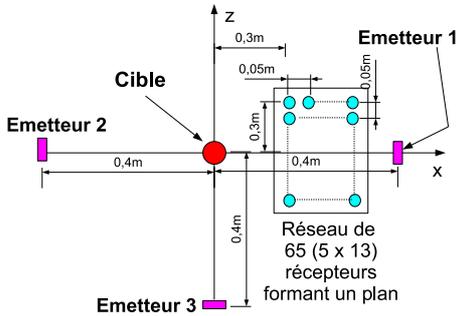


Figure 3: Disposition des transducteurs

Signal émis

Le signal émis est une sinusoïde modulée par une enveloppe gaussienne (cf. Figure 4). Son spectre est donné Figure 5.

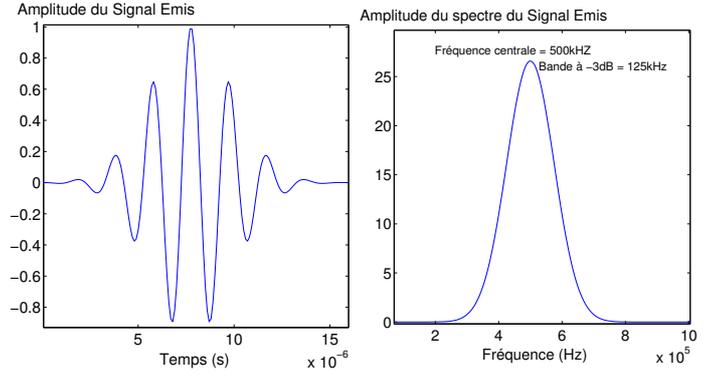


Figure 4: Signal émis (SE)

Figure 5: Spectre de SE

Cibles canoniques

Les cibles choisies sont des cylindres circulaires, élastiques (en acier inoxydable), de densité $\rho_c = 7.9$, de célérités longitudinale $C_l = 5790m/s$ et transversale $C_t = 3100m/s$, pleins et infinis suivant (Oy). Deux diamètres de cylindre ont été utilisés : $1.1mm$ et $10mm$, respectivement $ka \approx 1.15$ et $ka \approx 10.47$, avec a le rayon du cylindre.

Génération des données

De façon à valider l'algorithme, deux manières d'obtenir des données ont été choisies : par calcul du champ diffracté d'un cylindre circulaire élastique et par des mesures en cuve.

Données synthétiques pour la simulation

Le cylindre circulaire élastique de rayon a est placé au centre du système (cf. Figure 3). Il est immergé dans un fluide (eau) supposé non visqueux, non dissipatif, de densité $\rho_0 = 1$, dans lequel les ondes se propagent à la vitesse $c_0 = 1480m/s$. On suppose que le cylindre est éclairé par une onde plane monochromatique : $p_0 e^{i(k_0x - \omega t)}$, avec $k_0 = \frac{\omega}{c_0}$ la constante de propagation et p_0 l'amplitude de l'onde.

On pose : $x_0 = k_0a$, $x_L = k_La$, et $x_T = k_Ta$.

Au point de réception $M(r, \theta)$, le champ diffracté p^d par le cylindre s'écrit comme une série modale [6][7][8] :

$$p^d(r, \theta, \omega) = p_0 \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n i^n R_n(x_0) H_n^{(1)}(kr) \cos(n\theta) \quad (5)$$

Avec ϵ_n , le facteur de Neumann tel que $\epsilon_n = 2$ pour $n = 0$ et $\epsilon_n = 1$ pour $n > 0$

et

$$R_n(x_0) = -\frac{J_n(x_0)F_n - x_0 J_n'(x_0)}{H_n^{(1)}(x_0)F_n - x_0 H_n^{(1)'}(x_0)}$$

où,

$$F_n = \frac{\rho_0}{\rho_c} x_T^2 \frac{D_n^{(1)}}{D_n^{(2)}}$$

Avec J_n et $H_n^{(1)}$ respectivement les fonctions de Bessel

et de Hankel de première espèce et J'_n la dérivée de J_n .

$$D_n^{(1)} = \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \quad D_n^{(2)} = \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$a_{12} = (x_L^2 - 2n^2)J_n(x_L) + 2x_L J'_n(x_L)$$

$$a_{22} = x_L J'_n(x_L)$$

$$a_{32} = 2n^2[J_n(x_L) - x_L J'_n(x_L)]$$

$$a_{13} = 2n^2[J_n(x_T) - x_T J'_n(x_T)]$$

$$a_{23} = nJ_n(x_T)$$

$$a_{33} = (x_T^2 - 2n^2)J_n(x_T) + 2x_T J'_n(x_T)$$

Les données synthétiques sont obtenues de la manière suivante: $p^d(r, \theta, \omega)$ est multiplié par le spectre du signal émis, le résultat est ensuite passé en temporel via un transformée de Fourier inverse. Ces données synthétiques sont utilisées dans le processeur d'images afin d'obtenir des simulations.

Données expérimentales à partir de mesures en cuve

Une fois les signaux enregistrés pour tous les récepteurs, une étape d'étalonnage est nécessaire pour ne conserver que le champ diffracté par la cible. Cette étape se fait par élimination du champ direct provenant de l'émetteur en soustrayant les signaux enregistrés en présence de la cible aux signaux enregistrés en l'absence de celle-ci.

Images obtenues

Pour chaque image, l'intensité est normée par le maximum d'intensité de l'image. Le cylindre est parfaitement centré pour les simulations et il est centré avec une erreur de $\pm 5\text{mm}$ pour les mesures.

Images reconstruites pour l'émetteur 1

La Figure 6 représente l'image obtenue pour l'émetteur 1 à partir des données synthétiques (pour le cylindre de diamètre 1.1mm) et la Figure 7 représente le résultat équivalent pour des données expérimentales. Ces images sont reconstruites en diffraction arrière.

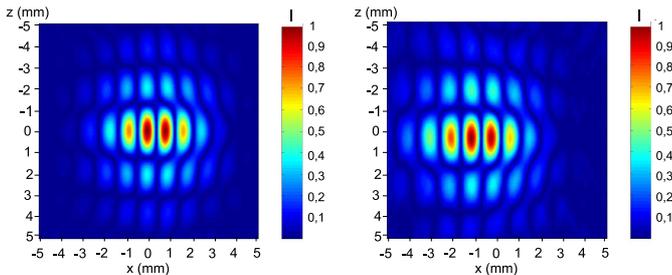


Figure 6: Image cylindre $\varnothing = 1.1\text{mm}$, simulation, émetteur 1

Figure 7: Image cylindre $\varnothing = 1.1\text{mm}$, mesures, émetteur 1

Images reconstruites pour l'émetteur 2

La Figure 8 représente l'image obtenue pour l'émetteur 2 à partir des données synthétiques (pour le cylindre de diamètre 1.1mm) et la Figure 9 représente le résultat équivalent pour des données expérimentales. Ces images sont reconstruites en diffraction avant.

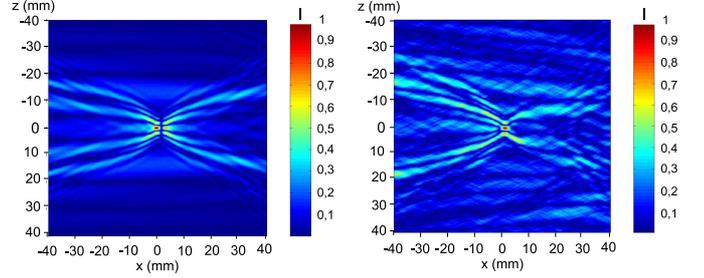


Figure 8: Image cylindre $\varnothing = 1.1\text{mm}$, simulation, émetteur 2

Figure 9: Image cylindre $\varnothing = 1.1\text{mm}$, mesures, émetteur 2

Images reconstruites pour l'émetteur 3

La Figure 10 représente l'image obtenue pour l'émetteur 3 à partir des données synthétiques (pour le cylindre de diamètre 1.1mm) et la Figure 11 représente le résultat équivalent pour des données expérimentales. Ces images sont reconstruites dans la position intermédiaire entre la diffraction arrière et avant.

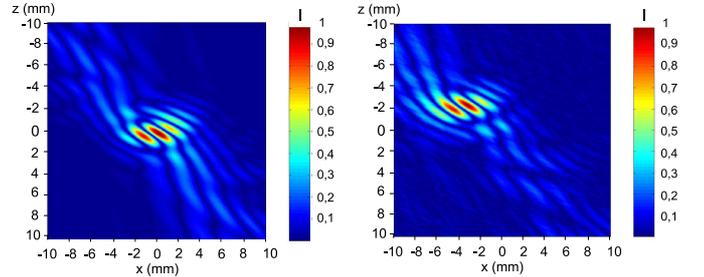


Figure 10: Image cylindre $\varnothing = 1.1\text{mm}$, simulation, émetteur 3

Figure 11: Image cylindre $\varnothing = 1.1\text{mm}$, mesures, émetteur 3

Commentaires sur les images

Les échelles sont différentes pour les trois positions d'émission. On remarque que les images reconstruites à partir des mesures sur les Figures 7, 9, et 11 sont respectivement très semblables aux images reconstruites à partir des simulations sur les Figures 6, 8, et 10. Pour l'émetteur en position 2, l'image obtenue à partir des mesures en cuve (cf. Figure 9) est beaucoup plus bruitée que celle obtenue à partir des données synthétiques (cf. Figure 8). L'étalonnage fait pour cette position d'émetteur n'est peut-être pas adaptée; le champ direct (provenant de la source) étant très intense par rapport au champ diffracté, la moindre variation de position de transducteur ou le moindre changement du milieu peuvent altérer l'image. Grâce aux images de simulations, pour lesquelles le cylindre est exactement centré, il est

possible de retrouver la position exacte du cylindre dans la cuve. Les images des cylindres font apparaître un ensemble de lobes qui empêchent de localiser précisément la cible. On remarque que pour les 3 positions d'émission, les images sont très différentes; ces images sont donc fonction de la géométrie du système.

Etude qualitative de la résolution

Pour étudier la résolution de manière qualitative, nous avons utilisé trois cibles identiques : cylindres de diamètre 1.1mm . Les deux plus proches sont espacés de 5mm ($D/\lambda \approx 1.67$) et les deux plus éloignés d'environ 30mm ($D/\lambda = 10$). L'image présente sur la Figure 12, a été obtenue à partir de mesures en cuve.

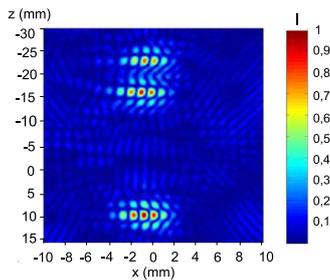


Figure 12: Image 3 cylindres $\varnothing = 1.1\text{mm}$, mesures, émetteur 1

Pour cette position de l'émetteur, on sépare les cibles espacées de 5mm ($D/\lambda \approx 1.67$).

Effet de la taille du cylindre sur la reconstruction

Pour étudier l'influence de la taille, nous avons choisi un cylindre de diamètre 10mm . Les images de ce cylindre sur les Figures 13 et 14 sont les reconstructions respectives à partir de la simulation et à partir des mesures; l'émetteur étant en position 1.

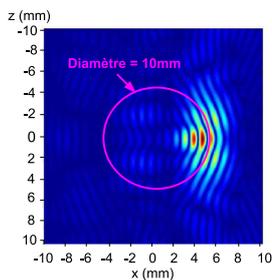


Figure 13: Image cylindre $\varnothing = 10\text{mm}$, simulation, émetteur 1

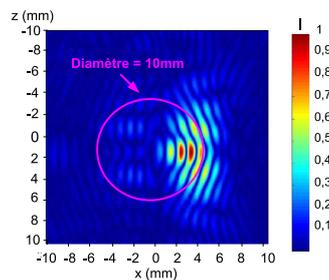


Figure 14: Image cylindre $\varnothing = 10\text{mm}$, mesures, émetteur 1

Les mesures et la simulation donnent encore une fois des résultats très semblables. On observe que l'intensité maximale se situe plutôt dans la zone éclairée.

Conclusion

Il y a globalement accord entre les images obtenues à partir de l'expérience et celles obtenues à partir de simula-

tions malgré un problème d'étalonnage lorsque l'émetteur est placé en face des récepteurs. Les images obtenues pourraient être utilisées pour faire de la détection. Par contre, la présence de lobes sur les images ne permet pas de localiser les cibles de façon précise. En ce qui concerne la classification, on distingue qualitativement des cylindres de tailles différentes, mais il est difficile d'être précis à cause des nombreux lobes.

Perspectives

La présence de lobes est lié aux caractéristiques du signal, aux paramètres de la cible (forme, nature) et à la géométrie du système. La réponse de la cible modélisée comme une somme de points brillants n'est peut-être pas une hypothèse appropriée, d'où la nécessité d'adapter l'algorithme de rétro-projection en y intégrant les paramètres physiques des cibles (forme, nature) et le signal émis. Dans chaque configuration, on ne remplit qu'une partie du plan temps-fréquence; il serait sûrement intéressant de combiner les plans temps-fréquence des 3 positions d'émission pour ne reconstruire qu'une seule image.

References

- [1] F. Daout, G. Ginolhac, F. Schmitt, M. Lesturgie, *Passive Bistatic Imagery of Targets Modelled by NEC*, International Conference on Radar Systems, Toulouse, Octobre 2004.
- [2] F. Daout, F. Schmitt, R. Guillermin, J.-P. Sessarego, *Processeur d'images pour un sonar multistatique*, Colloque National de Recherche en IUT, Rouen, Mai 2005.
- [3] A. Hétet, *Evaluation of specific aspects of synthetic aperture sonar, by conducting at sea experiments with a rail, in a frame of mine hunting systems design*, in Proc. Fifth European Conference of Underwater Acoustics, Vol.1, pp.439-444, Lyon 2000.
- [4] J. Châtillon, M.E. Bouhier, M.E. Zakharia, *Synthetic aperture sonar for seabed imaging, relative merits for narrow-band and wide-band approaches*, IEEE Jour. Oceanic Eng. 17(1), pp.95-105, 1992.
- [5] J. Callow *Signal Processing For Synthetic Aperture Sonar Image Enhancement*, Thesis, University of Canterbury, Electrical and Electronic of Engineering 2003.
- [6] P.M. Morse, H. Feshbach, *Methods of Theoretical Physics (Second Part)*, Edition: International Series in Pure and Apply Physics, Chapitre 11: The wave equation, p.1387-1398.
- [7] P.M. Morse, *Vibration and Sound*, Edition: International Series in Pure and Apply Physics, Chapitre 7: The radiation and scattering of sound, p.347-352.
- [8] L. Flax, G.C. Gaunard, H. Übertal, *Theory of Resonance Scattering*, Physical Acoustics Vol. XV, p.191-293.