

CFA/VISHNO 2016

ARMADA : localisation et contribution des sources au bruit de passage d'un navire

L. Lamotte^a, B. Nicolas^b, B. Oudompheng^c, M.Q. Pham^c et D. Fattaccioli^d

^aMICRODB, 28 chemin du petit bois, CS 80210, 69134 Ecully, France

^bCréatis, 7 Avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne Cedex, France

^cGIPSA LAB, 11 rue des Mathématiques, BP 46, 38402 Saint Martin D'Herès Cede, France

^dDGA Techniques navales - SDT/SCN/LSM, Avenue de la Tour Royale, BP 40915, 83050 Toulon Cedex, France
lucille.lamotte@microdb.fr



LE MANS

Les méthodes d'antennerie ont été développées dans le secteur des transports terrestres et aériens afin de cibler les sources d'importance et répondre aux certifications de plus en plus sévères. Dans le domaine marin, la DCSSM (Directive Cadre Stratégie du Milieu Marin), adoptée par l'Europe en 2008 et la mise en place de normes au bruit de passage conduisent à s'intéresser aux sources dominantes d'un navire, en plus du besoin militaire pour assurer une meilleure discrétion acoustique. Par rapport au système d'antennerie aérien à plusieurs dizaines de capteurs en 2D, en eau l'antenne d'hydrophones comporte seulement quelques capteurs en une ligne. De plus l'environnement peut présenter de faible rapport signal sur bruit. La transposition directe des méthodes d'air en eau n'apporterait donc pas des résultats intéressants. Le projet dual ARMADA, soutenu par la DGA a permis d'adapter et de développer des méthodes d'antennerie pour des sources en mouvement. Parmi les améliorations, sont développées dans cet article une pondération qui corrige les artefacts d'une grande largeur d'ouverture d'antenne, la mise au point de méthode de déconvolution, une synthèse d'ouverture d'antenne. Ces développements ont été validés lors d'une campagne de mesure en eau dans un lac avec une maquette de navire.

1 Introduction

Avec le développement du commerce mondial au cours des dernières années et l'industrialisation des pays asiatiques fortement peuplés, le secteur des transports s'est développé fortement dans les domaines maritime, terrestre et aérien. Cette pollution sonore relative aux niveaux d'émissions sonores des véhicules a conduit à la mise en place de régulation par des normes internationales (ISO) dans le domaine automobile [ISO 1990, ISO 2007, ISO 2009c, ISO 2015], dans le domaine aérien [ISO 2004, ISO 2009b], dans le domaine ferroviaire [ISO 2013] et plus récemment dans le domaine naval [ISO 2008, ISO 2009a, ISO 2012, ISO 2014].

Afin de respecter ces normes les constructeurs de véhicules ont intégré des procédures, notamment l'étude du bruit de passage de véhicule à l'aide d'une antenne acoustique [1,2,3]. Ces méthodes sont nombreuses dans la littérature du domaine acoustique aérien mais inexistantes dans le domaine sous-marin du bruit de passage de navire.

Entre 2012 et 2015, le projet Rapid ARMADA appuyé des travaux de thèse [4] s'est donc attaché à mettre au point une méthode en s'adaptant aux contraintes du milieu et de la mesure. En effet, en eau, il est difficile et coûteux de travailler avec des antennes d'hydrophones complexes et l'antenne utilisée se limite alors à une ligne d'hydrophone de quelques capteurs (9 dans le cas d'expérience en lac). Cette contrainte conduit à une résolution très limitée en basse fréquence, plage d'intérêt pourtant pour des sources tonales liées aux machines. Des artefacts apparaissent aussi face à un navire bien plus grand que l'antenne. Ensuite, le rapport signal à bruit est souvent mauvais dès qu'il s'agit de sources hydroacoustiques tout comme dans le domaine aéroacoustique.

Un premier paragraphe présentera succinctement la méthode initiale, avec une méthode de localisation basée sur du beamforming, puis une méthode de déconvolution essentielle pour mieux séparer les sources, débruiter et pouvoir obtenir la contribution de chaque source de bruit au niveau global mesuré, résultat d'intérêt pour diminuer ce dernier. Dans un deuxième paragraphe seront développées les améliorations amenées par rapport à l'environnement et les contraintes de mesure citées précédemment. Enfin, un dernier paragraphe illustrera à partir d'une expérimentation en eau la validation et l'apport de la méthode développée.

2 Méthodes initiales

2.1 Beamforming-MS

Avec des sources en mouvements, l'effet Doppler doit être pris en compte dans le traitement de beamforming classique.

Dans la plupart des applications en transport, l'Effet Doppler est important et le beamforming est implémenté dans le domaine temporel afin de corriger l'Effet Doppler par rééchantillonnage. Dans le domaine bruit de passage aéronautique, la correction est appliquée dans [2] dans le domaine temporel, alors que [1] l'applique dans le domaine fréquentiel avec des vitesses élevées mais une grande distance de mesure (supérieure à 100 m). Dans le cas de navire à faible vitesse en champ lointain (quelques mètres), un faible nombre de Mach peut également conduire à un traitement fréquentiel en s'assurant que l'Effet Doppler est négligeable sur une petite fenêtre temporelle, c'est-à-dire que le décalage fréquentiel reste dans la résolution correspondant à la fenêtre temporelle. Cela simplifie le traitement de Beamforming-MS pour sources en mouvement avec une implémentation dans le domaine spectral. Cette simplification est notamment adaptée pour le cas d'expérimentation en lac d'une maquette de navire de 21 mètres, dont la vitesse n'excède pas 5m/s passant à 10 mètre de l'antenne avec une fenêtre de 100 ms (10 Hz de résolution).

Sous ces hypothèses, [4] détaille l'implémentation de la méthode fréquentielle. Les mesures sont découpées en tranche qui sont traitées indépendamment. Pour chaque tranche, la grille de calcul se déplace avec la trajectoire et les sources sont considérées fixes. Pour chaque point l de calcul de la grille F et pour la fréquence f , le beamforming classique $P_{BF}(F_l, f)$ est calculé à partir de la tranche k . Finalement, le beamforming-MS est la moyenne de toutes les tranches du passage du navire devant l'antenne et est énergétiquement exprimé comme:

$$\Gamma_{BF}(F_l, f) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |P_{BF}(F_l(k), f)|^2$$

Afin de mieux évaluer la qualité des résultats avec la méthode initiale de Beamforming-MS et comprendre les limites qu'il faut lever, les réponses d'antenne sources fixes et sources mobiles sont comparées en Figure 1. Elles sont issues de simulations pour une antenne linéaire régulière de 9 hydrophones de 4 mètres utilisées dans les essais en lac.

La grille de calcul est linéaire également de 30 mètres pour couvrir le navire. Les résultats sont donnés suivant la grille en ordonnée et la fréquence en abscisse.

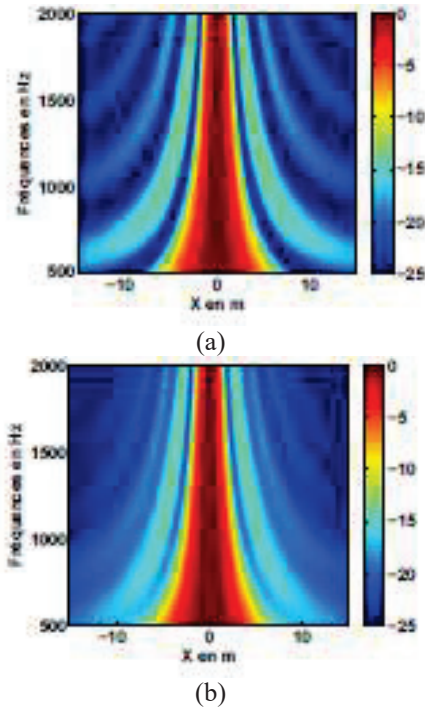


Figure 1: Réponse d'antenne pour une source fixe (a) et en mouvement (b) pour une distance grille de calcul / antenne de 10 mètres, une antenne linéaire régulière de 4 mètres et de 9 hydrophones.

L'antenne présente dans ce cas parfait une dynamique entre 10 et 15 dB, meilleure en source mobile qu'en source fixe avec un lissage des réponses d'antenne de chaque tranche et une résolution correcte au-delà de 1000 Hz avec la capacité à séparer 2 sources distantes d'environ 7 mètres.

Une deuxième simulation est menée avec 2 sources distantes de 5 mètres et un rapport signal à bruit de 5 dB afin de se placer dans un contexte réaliste. Les résultats du beamforming-MS sont présentés en figure 2.

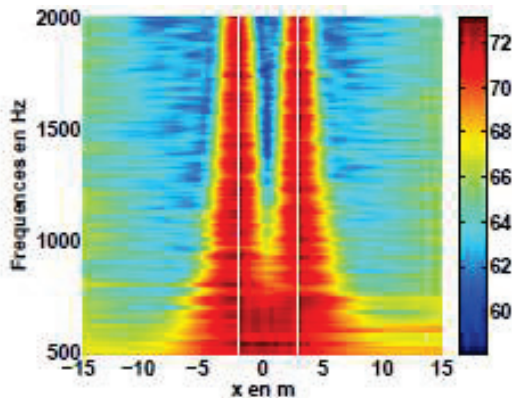


Figure 2: Résultat de beamforming MS pour 2 sources à 2 m/s en -2 m et +3 m, pour une distance grille de calcul / antenne de 10 mètres, une antenne linéaire régulière de 4 mètres et de 9 hydrophones, un RSB de 5 dB.

Ce résultat confirme une limite du pouvoir de séparation en dessous de 700 Hz, d'une diminution nette de la dynamique et de l'apparition de sources fantôme sur les bords.

2.2 Déconvolution du Beamforming-MS

Dans l'objectif d'obtenir une localisation précise des sources de bruit et leur contribution au bruit global, une méthode de déconvolution est nécessaire. Elle est appliquée sur les résultats de beamforming-MS afin d'estimer l'autospectre Γ_s inconnu des sources décorréliées d'une distribution de monopoles associée à la grille de calcul du beamforming. Avec les hypothèses suivantes :

- Les sources sont aléatoires, mutuellement indépendantes et stationnaires,
- Le nombre de point de la grille de calcul F est supérieur au nombre de source S,
- Le bruit est gaussien de moyenne nulle, mutuellement indépendant, et indépendant des sources.

Sur cette base, le résultat de beamforming peut être modélisé comme suit :

$$\Gamma_{BF}(F_l, f) = |PSF(F_l(k), s, f)|^2 \Gamma_s(s_l, f) + F[\Gamma_b(a, f)]$$

Où

P_{SF} est la matrice réponse d'antenne de taille $F \times S$ et $F[\Gamma_b]$ est la matrice de bruit

La déconvolution consiste à éliminer la réponse d'antenne du résultat de beamforming et accéder aux autospectres des sources. Cette estimation est possible en inversant le système linéaire.

Dans la méthode initiale, il a été choisi de le résoudre par une méthode des moindres carré avec une contrainte de positivité sur les densités des sources par un algorithme itératif de descente de gradient appelé SDM (Sound Density Modelling) [5,6].

$$\tilde{\Gamma}_s(F_l, f) = \arg \min \|\Gamma_{BF}(F_l, f) - |PSF(F_l(k), s, f)|^2 \Gamma_s(F_l, f)\|_2^2$$

$$\Gamma_s(F_l, f) > 0, \forall l \in [1, M]$$

A chaque itération, les autospectres sont estimés par la formule suivante :

$$\tilde{\Gamma}_s^i(s_l, f) = \tilde{\Gamma}_s^{i-1}(s_l, f)^{i-1} + 2\mu |PSF(F_l(k), s_m, f)|^2 H(\tilde{\Gamma}_{BF}^i(F_l, f) - |PSF(F_l(k), s_l, f)|^2 \tilde{\Gamma}_s^{i-1}(s_l, f)^{i-1})$$

La première itération est issue du résultat de beamforming et le paramètre μ fixe la vitesse de convergence.

Un traitement de déconvolution SDM a été appliqué sur le précédent résultat en figure 2 et est affiché figure 3. Il met en avant l'amélioration de la séparation des sources pour calculer leur contribution. Par contre, il demeure des sources sur les bords de la carte.

A partir de ces résultats, il est possible de définir des zones autour des sources réelles et définir une zone « résiduel » qui regrouperait toutes les sources non physiques. C'est ce qui a été réalisé et dont le résultat est présenté en figure 4. Le niveau des sources est bien reconstruit au-delà de 700 Hz, mais les fausses alarmes représentent une énergie non négligeable.

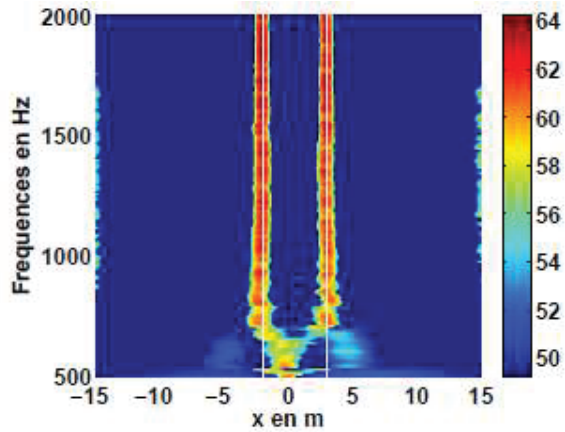


Figure 3: Résultat de déconvolution par méthode SDM du résultat figure 2.

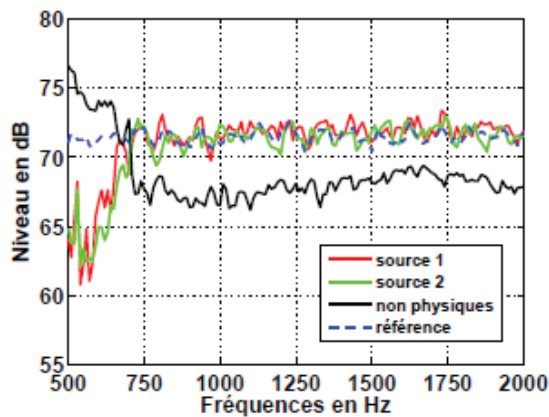


Figure 4: Résultat de spectre de contribution à partir de déconvolution par méthode SDM du résultat figure 3.

3 Améliorations des méthodes initiales

3.1 Pondérations du beamforming

En présence de véhicule large par rapport à la distance à l'antenne (21 mètre contre 10 m pour l'expérience en lac), le Beamforming-MS amplifie avec ses coefficients les points les plus éloignés. Il conduit alors à la dégradation de la dynamique de localisation et augmente l'énergie des sources non physiques reconstruites après déconvolution comme montré en figures 2 et 3. En effet, la méthode estime la pression acoustique émise à 1 mètre par une distribution de monopoles correspondant aux points de la grille de calcul. Par conséquent, l'énergie mesurée par les hydrophones sera amplifiée pour des points de calcul lointains. En présence de bruit, cela conduit à des niveaux de bruit de fond très amplifiés sur les cartes de localisation, en particulier aux extrémités si il y a un grand écart entre les distances hydrophones/points de la grille. Cela ne se produirait pas avec des distances équivalentes.

L'amélioration consiste donc à établir des pondérations qui lissent ces écarts et qui sont proportionnelles à la distance centre antenne/point de calcul et rendre les calculs insensibles à la position relative des points de calcul. Dans un calcul classique le rapport est inverse et conduit à des effets d'amplification sur les bords.

Ce traitement a été appliqué sur la simulation précédente avec 2 sources large bande. Le résultat est présenté en figure 5 et peut être comparé à celui en figure 2.

La pondération appliquée résulte en une meilleure dynamique, identique à celle calculée par la réponse d'antenne en figure 1.

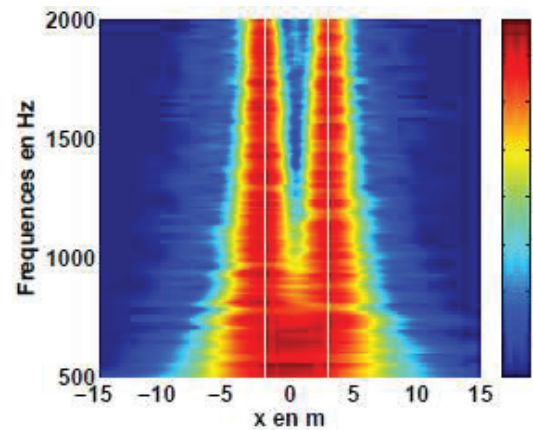


Figure 5: Résultat de beamforming MS pondéré pour 2 sources à 2 m/s en -2 m et +3 m, pour une distance grille de calcul / antenne de 10 mètres, une antenne linéaire régulière de 4 mètres et de 9 hydrophones, un RSB de 5 dB.

3.2 Synthèse d'ouverture

L'objectif de la méthode est d'utiliser le mouvement relatif entre sources et antenne pour agrandir virtuellement l'envergure de l'antenne et ainsi améliorer d'autant la résolution en basses fréquences (une antenne de double envergure améliore d'un facteur deux la résolution). La méthode développée dans ce projet se limite uniquement aux sources harmoniques. Son principe est inspiré de la méthode ETAM [7] avec les étapes suivantes :

- 1 Construction géométrique des hydrophones virtuels
- 2 Synchronisation des hydrophones virtuels avec les hydrophones réels
- 3 Traitement de localisation avec l'antenne synthétique plus grande.

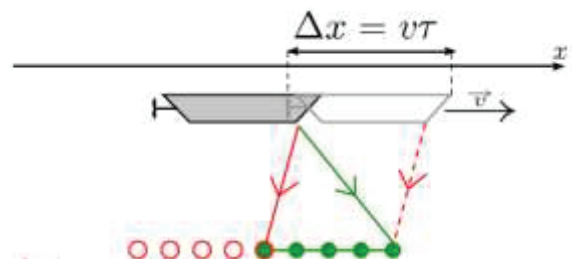


Figure 6 : Schéma du principe de synthèse d'ouverture par recouvrement de capteur (en rouge antenne virtuelle et en vert antenne réelle).

La méthode utilise des capteurs en recouvrement entre 2 blocs pour assurer une synchronisation robuste capteurs réels/capteurs virtuels comme représenté en figure 6. Des indicateurs expérimentaux de qualité de construction/synchronisation permettent de qualifier la reconstruction du signal.

Une simulation de deux sources sinusoïdales de fréquence 500 Hz a été réalisée afin de valider ce principe. L'antenne simulée est linéaire et possède 9 hydrophones régulièrement espacés de 50 centimètres. Les sources se déplacent à une vitesse uniforme de 2 m/s parallèlement à l'antenne. Les résultats sont présentés en figure 7. Ils démontrent la parfaite concordance entre la méthode par

synthèse d'ouverture qui permet de créer virtuellement une antenne de 17 hydrophones à partir de 9 réels et une antenne réelle de 17 hydrophones. Il y a un gain de 2 en résolution et aucune perte de dynamique.

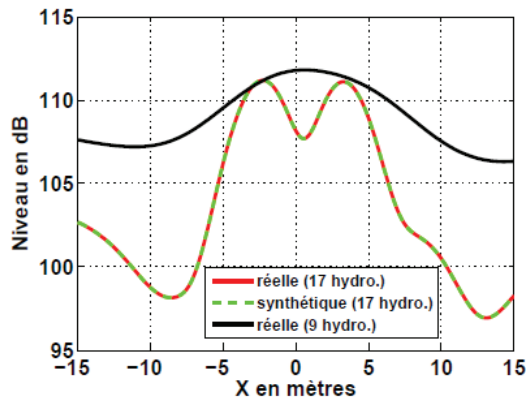


Figure 7: Résultat d'une simulation 2 sources sinusoïdales 500 Hz avec application de la méthode d'ouverture synthétique sur 9 microphones, et sans traitement avec 9 et 17 microphones.

3.4 Déconvolution par une fonction de coût avec une pénalité en norme L1 sur L2

Le post-traitement de déconvolution par une solution aux moindres carrés avec une contrainte de positivité est fortement sensible au modèle de réponse d'antenne. Cette matrice est mal conditionnée au regard du grand nombre de points de calcul comparé au nombre de sources réelles. Les fonctions sont donc très similaires. La résolution du problème peut mener donc à des solutions fausses dès lors qu'il y a une petite erreur de modèle et que le bruit de mesure n'est pas pris en compte. Il a été montré précédemment que même avec un RSB de 5 dB, les résultats de Beamforming MS sont impactés et ensuite il n'y a pas de solution sources qui correspondent à ces derniers, conduisant à l'ajout de sources non physiques.

La robustesse des méthodes est habituellement possible en ajoutant des hypothèses appropriées sur les données d'entrées (sources, fonctions de transfert). Et la stratégie consiste à formaliser mathématiquement ces contraintes dans la résolution du problème inverse comme la contrainte de positivité des sources ou la fidélité aux données mesurées. La parcimonie des sources est une donnée d'entrée qui peut être considérée par exemple en utilisant une pénalité en norme L1 sur L2 comme fonction de coût. Un premier algorithme VMF-B (variable matrix forward-backward) utilisant cette fonction coût a été testé [8]. Il utilise également une descente de gradient mais pondéré par une matrice.

De plus, dans un contexte d'application sous-marine avec des incertitudes sur les fonctions de transfert et du rapport signal à bruit, une méthode de déconvolution aveugle tentant d'estimer aussi bien les sources que les fonctions de transfert a été ensuite développée. L'algorithme de résolution est appelé SOOT (Smooth L1 Over L2 norm ratio) [9].

Les Figures 8, 9 et 10 présentent des résultats de beamforming MS, puis de déconvolution par SDM et enfin SOOT pour deux sources simulées 3 sinus et un large bande

dans un cas signal à bruit défavorable de -5dB. Les résultats montrent que la carte de beamforming a une mauvaise dynamique avec des lobes secondaires à -6dB. De ce fait, la méthode aux moindres carrés SDM ne résout pas le problème correctement en ajoutant beaucoup de sources non physiques sur la carte. Par contre la méthode SOOT trouve la solution.

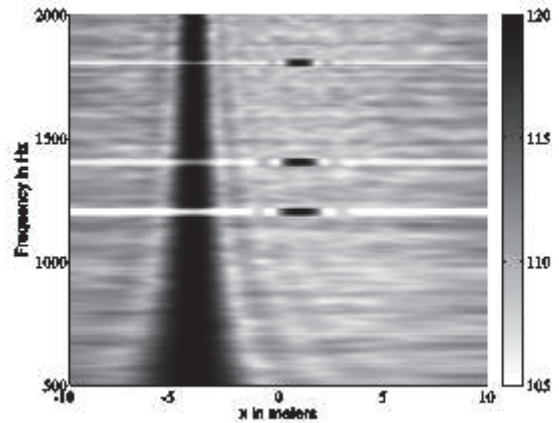


Figure 8: Résultat de beamforming MS pondéré pour 2 sources, pour une distance grille de calcul / antenne de 10 mètres, une antenne linéaire régulière de 4 mètres et de 9 hydrophones, un RSB de -5 dB.

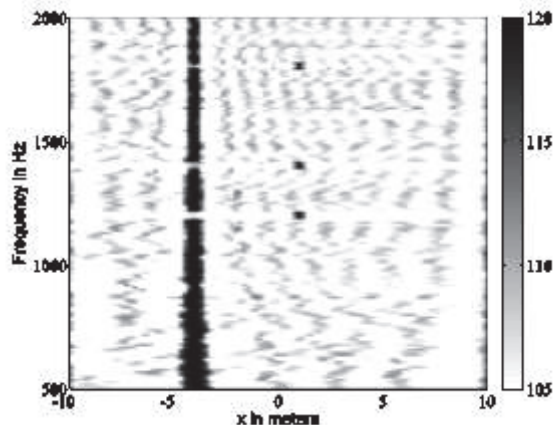


Figure 9: Résultat de déconvolution SDM du résultat beamforming figure 8.

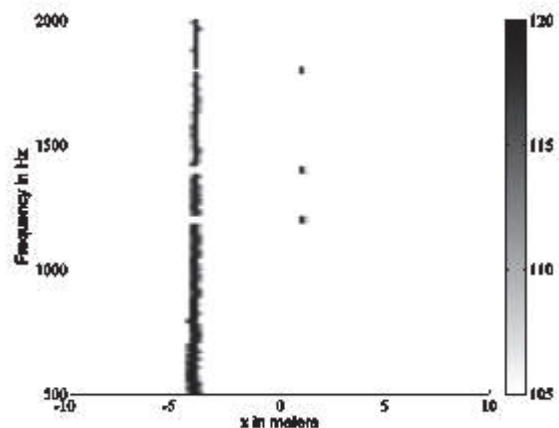


Figure 10: Résultat de déconvolution SOOT du résultat beamforming figure 8

4 Résultats expérimentaux en lac

4.1 Description de la manipulation

Pour valider les méthodes, plusieurs expérimentations en lac ont été réalisées pour vérifier que les performances sont en accord avec les simulations dans la configuration industrielle visée, validant ainsi la faisabilité d'un tel système.

Les essais se passent au lac de Castillon et sont accompagnés par DGA. L'installation schématisée en figure 11 est composée d'un système de tractage et d'une maquette à l'échelle 1/5ème de frégate. L'ensemble des sources était constitué de pots vibrants et de haut-parleurs instrumentés à l'intérieur de la carène.

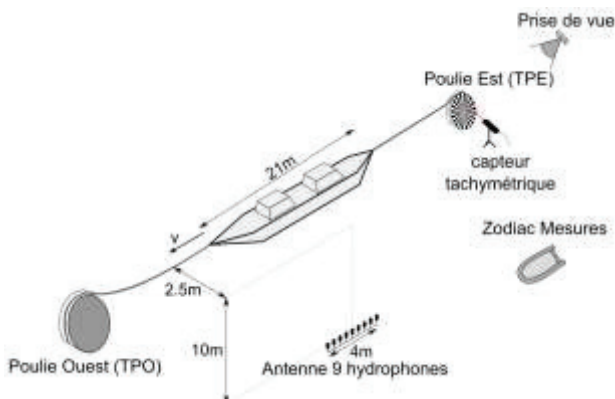


Figure 11: Schéma des essais en lac

La maquette étant tractée, les sources supplémentaires qui peuvent coexister avec les sources artificielles sont les sources hydroacoustiques. Une caractérisation de ces sources seules montre une bonne émergence des sources artificielles dans la bande de fréquence d'intérêt 500-2000 Hz pour une vitesse de 2 m/s.

4.2 Contributions de sources artificielles

Le premier cas présenté dans cet article est le passage avec de 2 sources artificielles, l'une tonale et l'autre large bande. Les résultats de beamforming MS et de déconvolution par SDM sont présentés sur les figures 12 et 13.

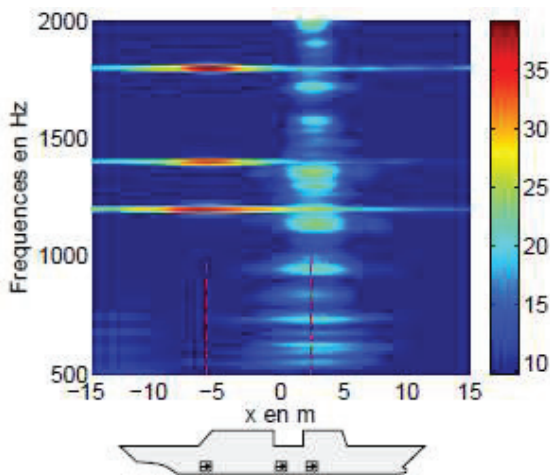


Figure 12: Résultat de beamforming MS pondéré pour 2 sources artificielles à 2 m/s, dans le cas expérimental de Castillon.

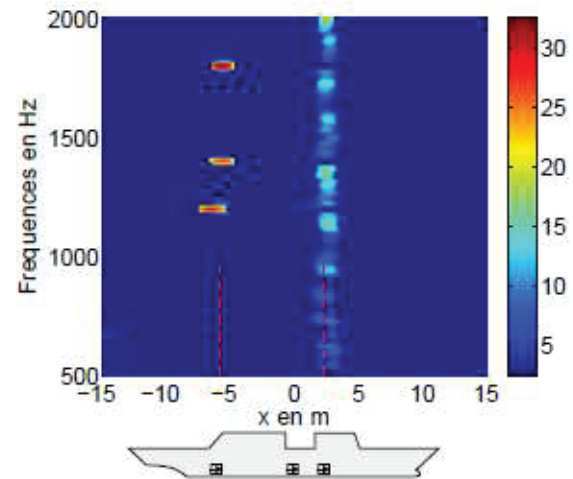


Figure 13: Résultat de déconvolution par SDM du beamforming MS figure 12 dans le cas expérimental de Castillon.

La méthode développée dans ce projet ARMADA et appliquée expérimentalement aboutit à de très bons résultats de contribution avec une bonne séparation des sources et pas de source non physique. L'étape de beamforming MS montrée en figure 12 met en avant la limite en résolution avec un lobe assez large en dessous de 1000 Hz. Ensuite, la déconvolution sépare les 2 sources au-delà de 500 Hz, l'absence de niveau sur la position de la source large bande en regard de la source tonale met tout de même en avant une limite de la dynamique, la source tonale dominant de plusieurs dB.

4.3 Ouverture synthétique

Le deuxième cas présenté ici valide la méthode d'ouverture synthétique avec le passage pour 2 sources tonales basse fréquence (700 Hz) espacées de 8.2 mètres et de niveau différents qui ne sont pas séparées par le set-up utilisé comme montré en figure 1. L'ouverture synthétique consiste donc à doubler virtuellement la taille d'antenne avec 2 positions de navire supplémentaires choisies avant et après le bloc traité. Les résultats de beamforming puis déconvolution sont présentés en figures 14 et 15.

Alors qu'il est impossible de deviner la présence de 2 sources sans l'ouverture synthétique, la deuxième source forme un lobe avec l'ouverture synthétique sans pour autant être certain de cette source. Par contre les résultats de déconvolution sur ces premiers résultats ne mettent pas en doute la présence de 2 sources avec des niveaux correctement estimés par l'ouverture synthétiques.

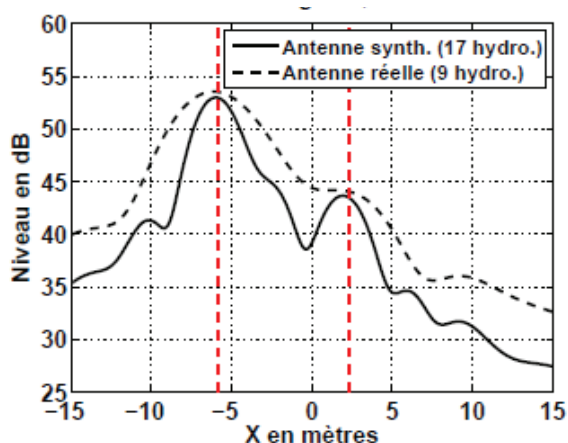


Figure 14: Résultat de beamforming MS pondéré pour 2 sources artificielles à 2 m/s, dans le cas expérimental de Castillon avec et sans traitement d'ouverture synthétique.

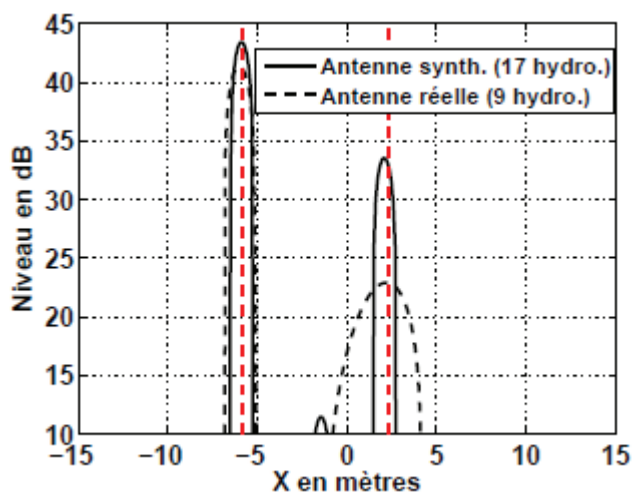


Figure 15: Résultat de déconvolution SDM du résultat de beamforming figure 14 avec et sans traitement d'ouverture synthétiques.

5 Conclusion

Ce projet a permis de mettre au point une méthode adaptée à l'analyse des sources au bruit de passage de navire. Les améliorations se sont concentrées sur les points faibles rencontrés dans ce genre d'expérimentation, à savoir la taille de l'antenne et le rapport signal à bruit. Il apporte incontestablement une avancée dans le domaine bruit de passage en eau avec des premières expérimentations en lac sur une maquette.

Les perspectives futures sont l'application de ces méthodes en mer et l'utilisation de ces méthodes pour l'analyse des sources d'intérêt non artificielles. Des travaux non présentés dans cet article comme la correction de trajectoire [4] ou l'application de la méthode SOOT sur données réelles fortement bruitées ont permis d'anticiper quelques difficultés de l'application de ces méthodes en mer.

Côté méthodes, des avancées intéressantes seraient notamment l'utilisation de l'ouverture synthétique avec des sources larges bandes.

Remerciements

MicrodB et Gipsa Lab remercient la DGA pour sa participation à ce projet et qui a permis d'avoir des résultats expérimentaux en lac de grandes valeurs.

Références

- [1] [Fleury 2011] Vincent Fleury et Jean Bulté. Extension of deconvolution algorithms for the mapping of moving acoustic sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 129, page 1417, 2011..
- [2] [Sijtsma 2012] P Sijtsma. Acoustic beamforming for the ranking of aircraft noise. Rapport technique, NLR, 2012..
- [3] [Courtois 2012] Florent Le Courtois. Caractérisation des sources acoustiques sur le matériel ferroviaire par méthode d'antennerie. PhD thesis, LAUM, Université du Maine, 2012.
- [4] [Oudompheng 2015] B. Oudompheng, "Localisation et contribution de sources acoustiques de navire au passage par traitement d'antenne réduite", Phd thesis, GIPSA-Lab, 2015.
- [5] [Bruhl 2000] S Bruhl et A Roder. Acoustic noise source modelling based on microphone array measurements. *Journal of sound and vibration*, vol. 231, no. 3, pages 611–617, 2000.
- [6] L. Lamotte, Mai Quyen Pham, Benoit Oudompheng, Barbara Nicolas, *A THEORETICAL AND EXPERIMENTAL COMPARISON OF THE DECONVOLUTION METHODS FOR MOVING SOURCES*, BeBeC 2016, Berlin, 29/02 et 01/03 2016
- [7] Stergios Stergiopoulos et Edmund J Sullivan. *Extended towed array processing by an overlap correlator*. *The Journal of the Acoustical Society of America*,
- [8] Mai Quyen Pham, Benoit Oudompheng, Barbara Nicolas, and Jérôme Mars, *SPARSE DECONVOLUTION FOR MOVING-SOURCE LOCALIZATION*, ICASSP 2016
- [9] [Repetti 2014] A. Repetti, M.-Q. Pham, L. Duval, E. Chouzenoux, and J.-C. Pesquet, "Euclid in a Taxicab: Sparse Blind Deconvolution with Smoothed $\ell_1=\ell_2$ Regularization", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 22, no. 5, pp. 539–543, Octobre 13, 2014..
- [10] [ISO 1990] ISO 9645, Measurement of noise emitted by two-wheeled mopeds in motion, 1990
- [11] [ISO 2004] ISO 10052, Field measurements of airborne and impact sound insulation and of service equipment sound -- Survey method, 2004
- [12] [ISO 2007] ISO 5130, Measurements of sound pressure level emitted by stationary road vehicles, 2007
- [13] [ISO 2008] ISO 14509-1, Small craft -- Airborne sound emitted by powered recreational craft -- Part 1: Pass-by measurement procedures, 2008
- [14] [ISO 2009a] ISO 14509-3, Small craft -- Airborne sound emitted by powered recreational craft -- Part 3: Sound assessment using calculation and measurement procedures, 2009

- [15][ISO 2009b] ISO 20906, Unattended monitoring of aircraft sound in the vicinity of airports, 2009
- [16][ISO 2009c] ISO 362-2, Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles - Part2: L category, 2009
- [17][ISO 2012] ISO/PAS 17208-1, Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships - Part 1: General requirements for measurements in deep water, 2012
- [18][ISO 2013] ISO 3095, Railway applications - Measurement of noise emitted by railbound vehicles, 2013
- [19][ISO 2014] ISO/DIS 16554.3, Ships and marine technology - Protecting marine ecosystem from underwater radiated noise - Measurement and report of underwater sound radiated from merchant ships, 2014
- [20][ISO 2015] ISO 362-1, Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles - Part1: M and N categories, 2015