

Localisation de sources de bruit en prospection minière sous-marine : une preuve de concept

Gia-Thuy Pham, Jerome I. Mars, Valentin Baron, Arthur Finez, Barbara Nicolas

▶ **To cite this version:**

Gia-Thuy Pham, Jerome I. Mars, Valentin Baron, Arthur Finez, Barbara Nicolas. Localisation de sources de bruit en prospection minière sous-marine : une preuve de concept. GRETSI 2019 - XXVI-Ième Colloque francophone de traitement du signal et des images, Aug 2019, Lille, France. hal-02328927

HAL Id: hal-02328927
https://hal.science/hal-02328927

Submitted on 23 Oct 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Localisation de sources de bruit en prospection minière sous-marine : une preuve de concept.

GIA-THUY PHAM[1,2], JEROME MARS[1], VALENTIN BARON[1,2,3], ARTHUR FINEZ[3], BARBARA NICOLAS[2]

[1] Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, GIPSA-Lab, Grenoble, France
11 rue des mathématiques, BP 46, 28402 Saint Martin d'Hères
[2] Laboratoire Univ. Lyon, INSA-Lyon, Univ. Claude Bernard Lyon 1, UJM-Saint Etienne, CNRS, Inserm, CREATIS, France
7 Avenue Jean Capelle, 69100 Villeurbanne
[3] MicrodB, Ecully, France
28 Chemin du Petit Bois, 69130 Ecully, France
[1]prenom.nom@gipsa-lab.grenoble-inp.fr, [2]prenom.nom@creatis.insa-lyon.fr, [3]prenom.nom@microdB.fr

Résumé - L'objectif est d'établir la faisabilité d'un système sous-marin déployable sur zone permettant d'estimer le bruit acoustique rayonné dans l'eau par l'exploitation minière du sous-sol marin en environnement profond, et d'estimer la perturbation acoustique générée par les machines déployées sur le fond et potentiellement l'impact environnemental acoustique. Il n'existe pas actuellement de méthode et système associé permettant de quantifier le bruit acoustique rayonné lié à l'exploitation minière sous-marine par grand fonds. Nous montrons dans cet article, les phases de conception et construction du réseau acoustique (conception de l'antenne), les étapes de validation des performances (localisation des sources) à partir de données réelles enregistrées lors d'une campagne à la mer (test petit fond). Les méthodes utilisées sont la formation de voies et la méthode MUSIC dans l'espace (x,y,z) en 3D.

Abstract - The objective is to establish the feasibility of an underwater system for estimating acoustic noise generated by seafloor mining in deep water and to evaluate its impact on marine life. We show in this article, several steps: the first is the design of the antenna, the second concerns validation of the performance (localization and source power) from real data recorded in situ –shallow water. We propose several algorithms as conventional beamforming and Music algorithms in 3D (x,y,z).

1 Introduction

L'exploitation minière des ressources du sous-sol marin en eaux profondes (> 1000 m) est appelée à se développer fortement au cours des prochaines années en Europe et en dehors, avec un marché émergent lié aux nodules polymétalliques (cobalt), aux sulfures hydrothermaux. Encore en phase d'exploration et avec de fortes contraintes environnementales, elle nécessitera le déploiement d'engins ou d'installations sur le fond. Le développement des exploitations industrielles sous-marines va se traduire par une multiplication des engins sous-marins. Les impacts environnementaux sont multiples, et l'un d'eux est lié au bruit acoustique émis par les engins ou systèmes déployés sur le fond, qui peut créer des nuisances inacceptables. L'objectif ici est d'établir la faisabilité d'un système sous-marin déployable sur zone, permettant la localisation et la mesure du bruit rayonné par des engins et équipements déployés sur le fond. Le système doit pouvoir localiser les sources déployées sur le fond marin ou à proximité du fond et estimer le bruit rayonné par chaque source. Il n'existe pas actuellement de méthode et système associé permettant de quantifier le bruit lié à l'exploitation minière sous-marine par grand fonds. Nous montrons dans cette étude que nous avons 1) construit une antenne spécifique et des sources caractéristiques (design et calibration) pour répondre aux objectifs, 2) proposé des méthodes de localisation robuste (Formation de Voies Conventionnelle CBF et MUSIC) et 3) analysé une campagne de données réelles validant l'efficacité des sources, de l'antenne dans le contexte d'une campagne en mer en petit fond (100m). Dans une première partie, nous faisons une description de l'antenne, des sources retenues. La configuration expérimentale est décrite en section 3. La méthodologie pour obtenir les cartes de localisation est présentée en section 4. L'analyse et l'interprétation sont réalisées en section 5.

2 Description de l'antenne et des sources.

2.1 Caractérisation des sources

On identifie trois différentes familles de systèmes [1].

1) Les trois machines de production sur le fond océanique : l'Auxiliary Cutter (AC) qui aplanit la roche sur un disque de 300m de diamètre, le Bulk Cutter (BC) qui le suit, broie et andaine le sol sur la zone et le Collecting Machine (CM) qui collecte le minerai.
2) La gaine flexible avec sa pompe permettant de remonter le minerai (Riser and Lifting System).
3) La plateforme d'opérations en surface (Production Support Vessel).

Le niveau de bruit de chaque système est indépendant (sources non corrélées), on somme les puissances acoustiques de chaque système pour connaitre la puissance acoustique totale [2-3]. Le niveau de bruit ambiant de fond étant très inférieur au bruit rayonné par l'ensemble des activités sur la zone de production, le bruit ambiant total sera égal au bruit ambiant rayonné par l'exploitation. Une étude théorique de l'ensemble des sources possibles a montré que le spectre ambiant peut être considéré comme un bruit blanc de 150 dB ref $1\mu Pa^2/Hz$ @1m ± 15 dB entre 0 et 5 kHz auquel viendrait s'ajouter des fréquences pures entre 0.1 et 4 kHz allant de 3 à 10dB dépendante de la vitesse de rotation des têtes tournantes des machines [4] (Figure 1).

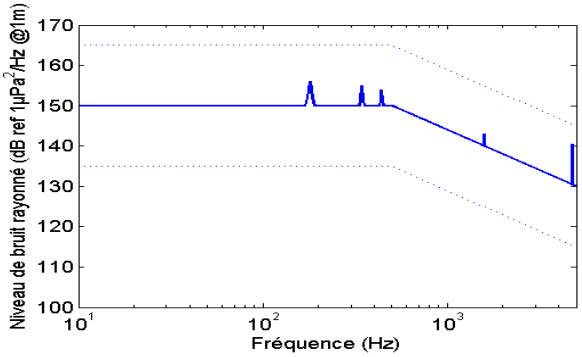


Figure 1. Spectre théorique du bruit ambiant relatif aux machines, pompes et bateau de surface.

2.2 Description de l'antenne.

Les contraintes expérimentales (2000 m de fond, invariance par rotation de l'antenne, distance de sécurité entre antenne et machine de production) ont montré qu'une forme axisymétrique doit être envisagée pour faire face aux incertitudes du déploiement. L'étude de 6 géométries différentes d'antenne a été faite (conique, linéaire, cercle, carré etc.). Une mise à l'échelle a été ensuite effectuée pour respecter les contraintes de la campagne « test » en mer. Après avoir testé 385 cas d'antenne conique, nous avons conclu que la forme conique « pointe vers le bas » avec 21 capteurs est la meilleure pour le cas réel [5-6]. L'utilisation des performances : dynamique moyenne et résolution moyenne ont été utilisées pour faire ce choix (diagramme de Paréto). L'antenne 3D fait 2.7 m de hauteur, avec 3 étages espacées uniformément, le nombre d'hydrophones est 1, 9, 11 de bas en haut, successivement (Figure 2).



Figure 2. Antenne conique « pointe vers le bas » construite pour la campagne Cavalaire 2018 sur le pont de l'Europe. (Crédits IFREMER).

3 Configuration expérimentale

Pour valider les performances du réseau, des expériences ont été réalisées en eaux peu profondes (baie de Cavalaire 19-20 Avril 2018), dans un environnement de 104 mètres de profondeur. L'antenne est déployée à 53 m du fond. Diverses configurations de sources simulant le bruit des systèmes sont proposées.

• Une première source (appelée Source 1) émet des sinusoïdes de 3, 4, 5, 6 ou 7 kHz séparément pendant 10s. Nous choisissons la fréquence de 4 kHz (Figure 3)

• Une deuxième source (Source 2) émet un signal large bande représentant le bruit de la machine où la DSP est constante de 10 à 1 000 Hz et diminue de 15 dB par décade à partir de 1 kHz jusqu'à 7 kHz (Figure 3).

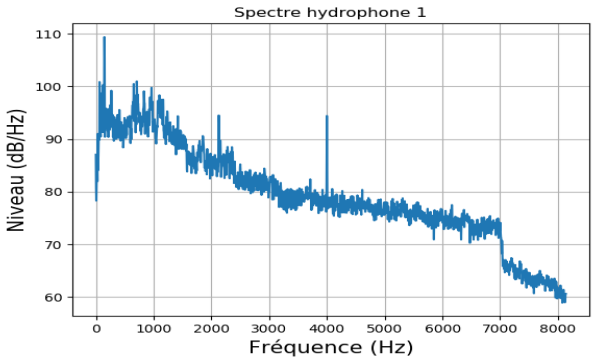


Figure 3. DSP reçue sur l'hydrophone. Bruit ambiant total avec une fréquence pure visible à 4 kHz (source 1) et un bruit large bande de DSP plate de 10 à 1 kHz et une décroissance jusqu'à 7 kHz (Source 2). Signaux échantillonnés à 16276Hz, DSP calculée sur 10 secondes, moyennée avec fenêtre de Hamming de 2048 points.

Les deux sources sont positionnées à 34 m du fond et respectivement à 18 m à l'Est et 95 m au Nord-Est de l'antenne. (Figures 4 et 5).

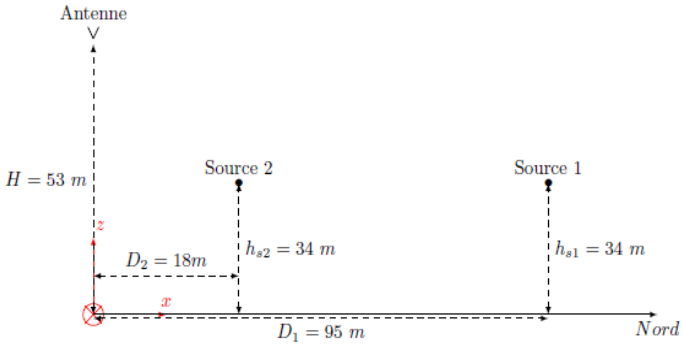


Figure 4 : Projection dans le plan (x, z) du dispositif expérimental antenne et source. z=0 correspond au fond. La centrale inertielle de l'antenne est à 53 m du fond.

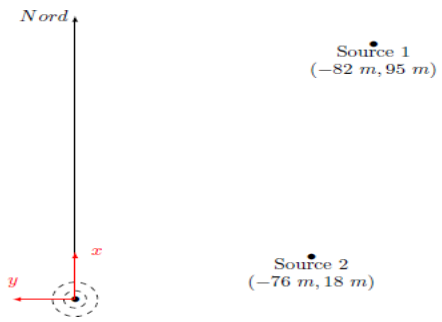


Figure 5 : Projection dans le plan (x, y) du dispositif expérimental (à comparer avec les cartes de la localisation).

4 Localisation des sources

La localisation de sources est un problème fondamental de traitement du signal. Il existe de nombreuses méthodes telles que la formation de voies conventionnelle (Conventionnal BeamForming CBF), la méthode de Capon, la méthode MUSIC et ses dérivées. Dans le contexte opérationnel, nous présentons l'utilisation de l'algorithme de formation de voies conventionnelle et la méthode haute résolution MUSIC. En présentant d'une part une justification théorique des méthodes et d'autre part des résultats numériques, nous voulons donner une vue complète des techniques de localisation de source dans un contexte d'exploitation minière sous-marine.

4.1 Formation de voie conventionnelle.

Classiquement, la formation de voies (FV) est calculée en fonction de l'angle d'arrivée sur une antenne linéaire.

Dans notre cas, la FV se calcule pour tout point $\vec{r}$ de l'espace 3D. L'estimation est cependant réalisée pour un plan (x,y) situé à z_0 fixé, et égal à 34 m dans ce cas (profondeur des sources). Pour un point $\vec{r}$ quelconque, la FV fait intervenir l'interspectre $S_{mn}(f)$ à la fréquence des pressions enregistrées par les capteurs notés m et n ($m \leq M, n \leq M$) [6]. La pression quadratique moyenne du signal focalisé sur le point de coordonnées $\vec{r}$ est :

$$P_F^2(\vec{r},\mathrm{f}) = \frac{\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{M} h^{+}(\overrightarrow{r_m}-\vec{r},f)\, S_{mn}(f)\, h(\overrightarrow{r_n}-\vec{r},f)}{\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{M} |h(r_m-r,f)|^2 \;\; |h(r_n-r,f)|^2} \quad (1)$$

La fonction h est un vecteur de pointage dans l'espace 3D caractérisant le modèle de propagation acoustique choisi d'un point de coordonnée $\vec{r}$ vers un capteur n.

$$h(\overrightarrow{r_n}-\vec{r},f) = \frac{1}{4\pi}\frac{e^{-ik\|\overrightarrow{r_n}-\vec{r}\|}}{\|\overrightarrow{r_n}-\vec{r}\|} \quad (2)$$

Avec $= \frac{2\pi f}{c}$, où f est la fréquence traitée et c la vitesse du son dans le milieu.

Pour une seule source à la fréquence f et d'amplitude A, le niveau focalisé au point $\vec{r}$ est $P_F^2(\vec{r},\mathrm{f}) = A^2$. On retrouve donc bien l'amplitude de la source à partir des niveaux mesurés sur les capteurs.

4.2 Méthode MUSIC.

La méthode MUSIC (MUltiple SIgnal Classification) est la méthode à haute résolution la plus connue. Elle a été introduite par Bienvenu et Kopp [7], puis définie ensuite par Schmidt [8]. Elle est basée sur la décomposition (SVD) de la matrice interspectrale des signaux issus des capteurs en un sous-espace "signal" et un sous-espace « bruit ». La fonction proposée par la méthode MUSIC pour estimer la direction des sources est définie par :

$$P_{Music}^2(\vec{r},\mathrm{f}) = \frac{1}{\sum_{q=P+1}^{M} |h(\overrightarrow{r_n}-\vec{r},f)\,.u_q|^2} \quad (3)$$

Avec les valeurs propres sont ordonnées dans l'ordre décroissant, P le nombre de valeurs propres pour construire l'espace signal, et u_q les vecteurs propres du sous-espace bruit issus de la décomposition.

5 Interprétation des résultats.

Les résultats présentés sont issus de la campagne en mer décrite précédemment avec la source 1 (sinus à 4 kHz) et la source 2 (bruit large bande de 1 à 7 kHz). Le spectre d'un signal enregistré est représenté sur la Figure 3. Pour toutes les cartes de localisation, le plan du repère est (y,x) suivant la règle de la main droite (cf Figure 5).

5.1 Carte de localisation avec CBF

Les résultats de la méthode CBF aux fréquences 2, 3, 4 et 5 kHz sont présentés figure 6 (quatre cartes de localisation identiques à la figure 5). Dans la configuration, nous devrions voir la source 2 (bruit large bande) présente sur les 4 cartes en position (-76m, 18m) et la source 1 (sinus 4 kHz) que sur la carte 4 kHz en position -82, 95m. En examinant la figure 6, pour les fréquences de travail 2, 3 et 5 kHz nous ne voyons que le bruit large bande. A 4 kHz, seule la source 1 est présente. On voit aussi que le nombre d'artéfacts est élevé. Avec le CBF nous n'avons pas de dynamique assez élevée pour voir les deux sources (seconds lobes du sinus cardinal > lobe principal de la large bande). Par ailleurs, concernant la précision de l'estimation, nous n'avons pas de réalité terrain mais uniquement une zone de confiance, calculée à partir des possibles erreurs de positionnement GPS du bateau attaché à la source (6m), de la distance entre le bateau et la source (6m pour source 1, 15m pour source 2) et de la tension des câbles. Nous observons que la localisation des sources est satisfaisante car située dans la zone de confiance. On note également que le choix du plan de reconstruction peut accroitre l'erreur de localisation. Dans le cas d'une profondeur de source inconnue, il est nécessaire de réaliser à la reconstruction à différentes profondeurs possibles.

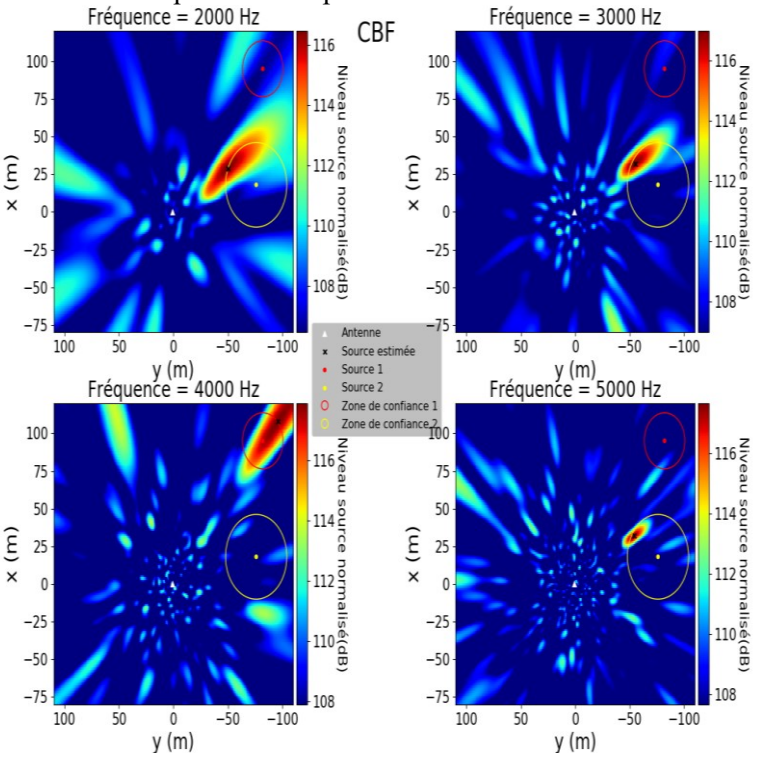


Figure 6 : Localisation des sources (1 et 2) par CBF pour 4 bandes de fréquences (2, 3, 4 et 5 kHz). Source 1 présente uniquement à 4 kHz. Source 2 Large bande présente partout sauf en 4 kHz.

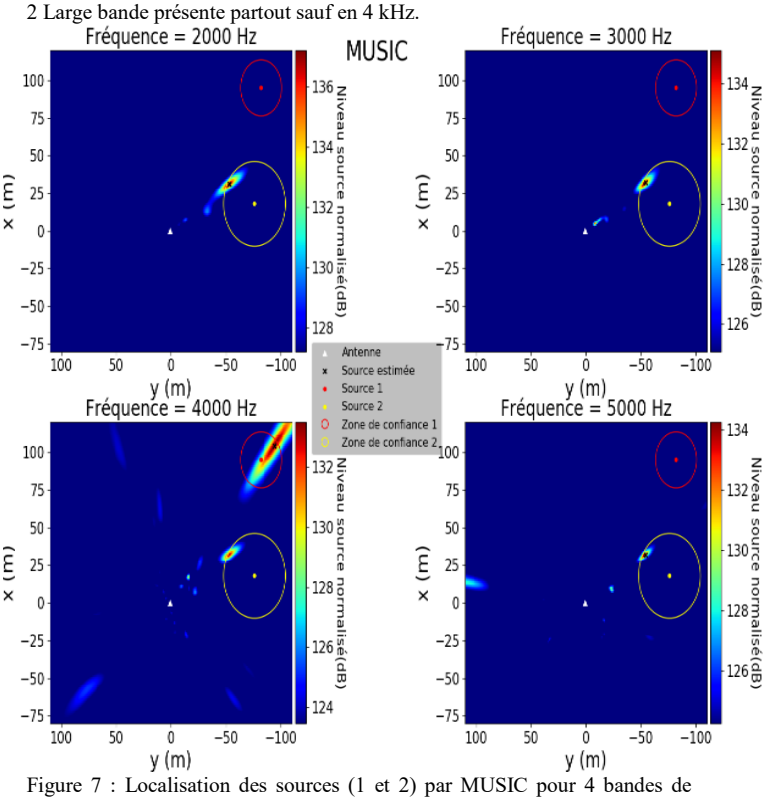


Figure 7 : Localisation des sources (1 et 2) par MUSIC pour 4 bandes de fréquences (2, 3, 4 et 5 kHz). Source 1 présente uniquement à 4 kHz. Source 2 Large bande présente partout.

5.2 Carte de localisation avec MUSIC

A partir des mêmes données, on génère, figure 7, les cartes de localisation avec la méthode MUSIC calculée à partir de la construction d'un sous espace signal de

dimension 7. Les résultats montrent, comme la méthode CBF, que la source 1 (Sinus 4 kHz) en position (-82m, 95m) est présente uniquement à la fréquence de travail 4 kHz. Par contre, nous voyons, que la source 2 (Large bande) est maintenant présente à toutes les fréquences de travail, contrairement à la méthode CBF. La localisation des sources est également compatible avec les zones de confiance. On observe que le nombre d'artéfacts est beaucoup moins élevé qu'avec la méthode CBF.

6 Analyse de taille du sous espace

Pour connaître, dans le cas réel, la dimension de l'espace signal à utiliser dans l'algorithme MUSIC, nous avons analysé la décroissance des valeurs propres (figure 8) et montré qu'en prenant 7 valeurs propres nous pouvions identifier l'espace signal.

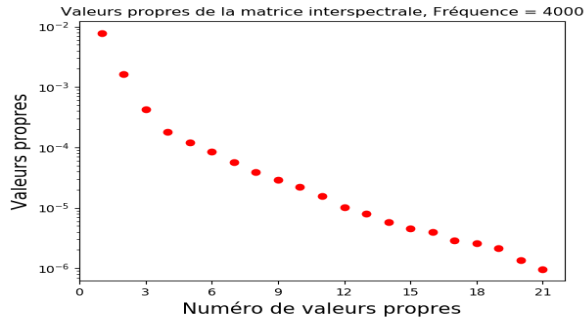


Figure 8 : Décroissance des valeurs propres.

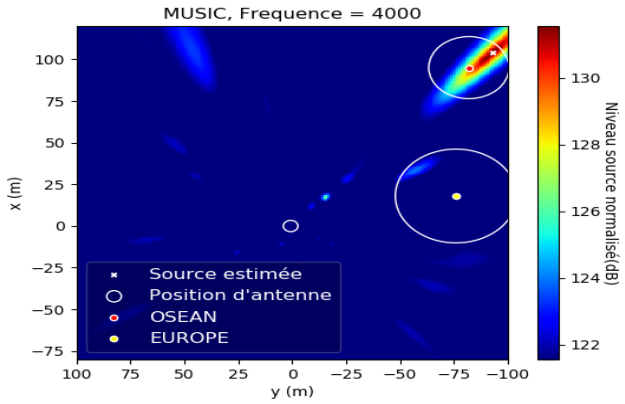


Figure 9 : Localisation des sources à 4 kHz construite à partir d'un sous espace de dimension 3 pour MUSIC.

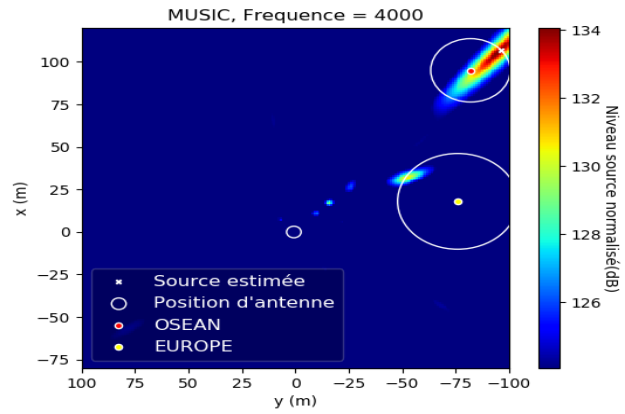


Figure 10 : Localisation des sources à 4 kHz construite à partir d'un sous espace de dimension 7 pour MUSIC.

Nous avons tracé les localisations à 4kHz en fonction de trois valeurs de dimension de l'espace signal. (P= 3, 7 et 14). Si l'on prend la dimension 3, les deux sources ne sont pas retrouvées correctement (Fig. 9). Pour P = 7 (fig. 10), les deux sources sont bien trouvées sans fausse alarme. En prenant 14, le taux de fausse alarme est important même si les sources sont présentes (Figure 11). Il est important de noter que le choix de la taille du sous espace bruit est une étape importante de l'algorithme. Dans le cas présent, il a été réalisé de manière empirique en supposant que le nombre de sources à localiser était inférieur à une dizaine mais inconnu.

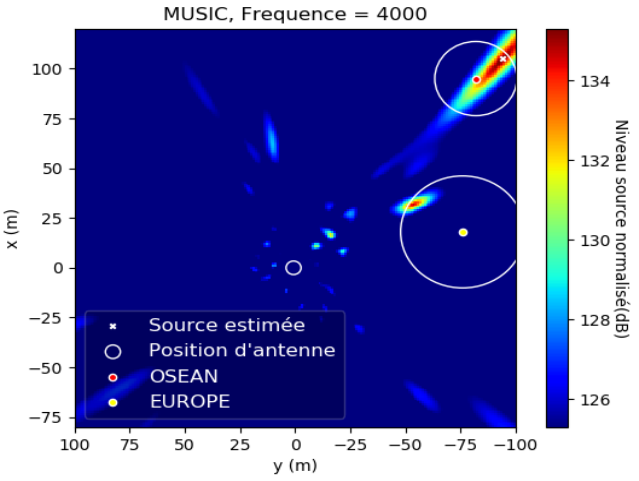


Figure 11 : Localisation des sources à 4 kHz construite à partir d'un sous espace de dimension 14 pour MUSIC.

7 Conclusion

Nous avons prouvé la faisabilité (conception de l'antenne, méthodologie de localisation et performance), d'un système sous-marin déployable sur zone, permettant d'estimer et localiser le bruit acoustique rayonné en prospection minière sous-marine.

8 Remerciement

Le projet a été réalisé dans le cadre du projet FUI AAP22 Abysound. Les auteurs remercient vivement l'ensemble des partenaires du projet (Naval Group, Semantic TS, Osean, IFREMER, LMA, LSIS), la BPI et le TPM.

9 Références

[1] Brevet US7784201 B2 : TECHNIP : System and method of utilizing monitoring data to enhance seafloor sulfide production for deepwater mining system.
[2] C. R. Green Jr, Characteristics of oil industry dredge and drilling sounds in the Beaufort Sea. JASA, 82(4), 1315-1324, 1987.
[3] C. Erbe, R. McCauley, C. McPherson and A. Gavrilov, Underwater noise from offshore oil production vessels, JASA, 133(6); EL465-70, 2013.
[4] K. Reine, D. Clarke, and C. Dickerson, "Characterization of underwater sounds produced by hydraulic and mechanical dredging operations," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 135, no. 6, pp. 3280–3294, Jun. 2014.
[5] E. Sarradj, A generic approach to synthesize optimal array microphone arrangements, BeBEC, 2016 p1-12.
[6] Le Courtois, F, Caractérisation des sources acoustiques sur le matériel ferroviaire par méthode d'antennerie. Thèse de Doctorat, Le Mans, 2014.
[7]G. Elias, Experimental techniques for source location, Von Karman Institute, Lecture Series, 1997.
[8] G. Bienvenu and L. Kopp. Source power estimation method associated with high resolution bearing estimator. ICASSP 1981(6), pp 153–156.
[9] R. Schmidt. Multiple emitter location and signal parameter estimation. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 34(3) :276–280, March 1986.