

Optimisation génétique d’antenne pour l’imagerie acoustique

Sylvain AMAILLAND¹, Jean-Hugh THOMAS¹, Romuald BOUCHERON², Charles PÉZERAT¹, Jean-Claude PASCAL¹

¹Laboratoire d’Acoustique de l’Université du Maine
1 rue Aristote, 72000 Le Mans, France

²DGA Techniques Hydrodynamiques
Chaussée du Vexin, 27105 Val-de-Reuil, France

sylvain.amailland@univ-lemans.fr, jean-hugh.Thomas@univ-lemans.fr
romuald.boucheron@intradef.gouv.fr,
charles.pezerat@univ-lemans.fr, jean-claude.Pascal@univ-lemans.fr

Résumé – L’utilisation d’un réseau de capteurs acoustiques pour la localisation et la quantification de sources acoustiques a été largement étudiée dans la littérature et constitue encore aujourd’hui un sujet de recherche. Différentes techniques d’imagerie, telles que la méthode de formation de voies et des techniques de déconvolution ont été proposées dans la littérature. D’autres approches, basées sur la résolution d’un problème inverse, comme la méthode itérative des sources équivalentes (iESM) ou la formation de voies inverse généralisée (GIB) ont également été introduites. Les performances de ces approches multi-capteurs reposent sur la qualité du rapport-signal-sur-bruit ainsi que sur la géométrie de l’antenne utilisée. L’objectif de ce papier est de mettre en avant l’amélioration apportée par l’optimisation géométrique d’un réseau de capteurs sur les effets de lobes pour la formation de voies, sur la vitesse de convergence pour l’algorithme de déconvolution DAMAS et sur la robustesse pour la méthode iESM face au bruit de mesure. Un algorithme génétique est proposé pour améliorer les cartographies résultant des différentes méthodes. Des simulations numériques mettent en avant les améliorations apportées par le processus d’optimisation.

Abstract – Localisation and quantification of acoustic sources using sensor arrays have been largely studied in the literature and this subject is still a challenging topic in acoustic research. Several methods for acoustic imaging (beamforming, functional beamforming, ...) or inverse method (GIB, iESM, ...) have been used to understand the behaviour of acoustic sources. The quality of these approaches is linked to the signal-to-noise ratio as well as the geometry of the acoustic array. The purpose of this paper is to investigate the benefit of the array geometry optimisation for imaging and techniques. The aim of the paper is to investigate the improvement brought by geometry optimization in terms of side lobe effects for the beamforming approach as well as speed of convergence for the deconvolution algorithm DAMAS and robustness against noise measurement for iESM. The improvements brought by these antenna are shown through numerical simulations.

1 Introduction

Les techniques d’imagerie acoustique ou les méthodes inverses reposent sur la connaissance *a priori* du modèle de propagation associé à l’environnement. Dans certains cas, il peut être délicat de choisir la géométrie d’antenne adaptée au problème et à la méthode utilisée. Depuis plusieurs décennies, des techniques d’optimisation d’antenne ont été proposées dans la littérature pour généralement améliorer les effets de lobe intrinsèques aux résultats de formation de voies. Moffet [1] propose des antennes à une dimension qui minimisent le nombre d’espaces inter-capteur redondants. L’inconvénient de ce type d’antenne est que la résolution spatiale n’est pas forcément améliorée. Plus récemment, Malgoezar *et al.* [2] proposent, seulement dans le cas de sources en champ lointain, d’utiliser un algorithme à évolution différentielle pour réduire les effets de lobe de la méthode de formation de voies. De manière générale, les géométries d’antenne sont optimisées pour les méthodes de formation de voies et leurs influences sur les techniques de déconvolution ou de résolution de problème inverse, qui sont de plus en plus utilisées, sont peu traitées dans la littérature.

L’objectif de cette communication est de proposer différents critères d’optimisation pour améliorer le résultat de cartographie pour les méthodes de formation de voies, de déconvolution DAMAS [3] (Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources) et de méthode inverse iESM [4] (iterative Equivalent Source Method). Un algorithme génétique est proposé pour optimiser la position des capteurs, car ce type d’algorithme est bien adapté à la résolution de problèmes inverses dont les fonctions de coût ne sont pas universellement établies. Il présente également l’avantage d’être moins coûteux en temps de calcul que les méthodes de Monte-Carlo [5] du fait du processus de recherche guidé. Une étude concernant l’influence de la géométrie d’antenne sur les effets de lobe de la formation de voies, sur la vitesse de convergence de l’algorithme de déconvolution DAMAS et sur la robustesse de la méthode iESM est présentée. Les bénéfices apportés par des géométries d’antenne optimisées sont mis en avant à travers des simulations numériques en champ libre. Le champ de pression p résultant du rayonnement d’une distribution de sources

de débit volumique q s'exprime sous forme matricielle par

$$\mathbf{p} = \mathbf{G}\mathbf{q} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

avec \mathbf{n} le bruit de mesure et \mathbf{G} la matrice des fonctions de Green du milieu pour une source acoustique monopolaire.

1.1 Formation de voies

La méthode de formation de voies est une approche directe permettant d'estimer la densité spectrale de puissance $|\tilde{y}_i|^2$ au point de focalisation i

$$|\tilde{y}_i|^2 = \tilde{\mathbf{w}}_i^H \hat{\mathbf{G}}_{pp} \tilde{\mathbf{w}}_i, \quad (2)$$

avec $\tilde{\mathbf{w}}_i$ le vecteur de pointage et $\hat{\mathbf{G}}_{pp}$ la matrice interspectrale du champ acoustique. Le processeur de Bartlett est utilisé et permet d'exprimer le vecteur de pointage sous la forme [6]

$$\tilde{\mathbf{w}}_i = \frac{\mathbf{h}_i}{\mathbf{h}_i^H \mathbf{h}_i + \gamma}, \quad (3)$$

avec $\gamma = \sigma_n^2 / |q_i|^2$ le rapport bruit-sur-signal et \mathbf{h}_i le vecteur des fonctions de transfert entre le point de focalisation i et les M capteurs.

1.2 Déconvolution

Généralement le résultat de formation de voies souffre d'une mauvaise résolution spatiale en basses fréquences. La méthode de déconvolution DAMAS a été introduite par Brooks *et al.* pour réduire les effets de lobes intrinsèques à la géométrie de l'antenne et au propagateur utilisé [3]. DAMAS repose sur l'hypothèse que les sources sont statistiquement indépendantes les unes des autres. Dans ce cas et si $\gamma = 0$, le résultat de formation de voies est donné sous forme matricielle par

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{A}\mathbf{X}, \quad (4)$$

avec \mathbf{X} le vecteur des débits quadratiques et \mathbf{A} la réponse de l'antenne. Le problème est résolu itérativement et en appliquant une contrainte de positivité sur la solution.

1.3 Méthode itérative des sources équivalentes

La méthode des sources équivalentes fait partie des approches d'identification et est une extension de la méthode décrite par Nelson *et al.* [7]. La principale différence entre la méthode de formation de voies et la méthode iESM est que la première est basée sur une inversion terme-à-terme du problème, tandis que la seconde découle de l'inversion de la matrice \mathbf{G} . La solution $\tilde{\mathbf{q}}_n$ s'obtient en minimisant itérativement la fonctionnelle suivante,

$$\tilde{\mathbf{q}}_n = \underset{\mathbf{q}_n}{\text{Argmin}} \{ \|\tilde{\mathbf{p}} - \mathbf{G}\mathbf{q}_n\|_2^2 + \eta^2 \|\mathbf{L}_{n-1}\mathbf{q}_n\|_2^2 \}, \quad (5)$$

$$\text{avec } \mathbf{L}_n^{-1} = \text{diag} \left(\frac{2}{p} |\mathbf{q}_n|^{p-2} \right). \quad (6)$$

qui peut être vue comme la régularisation de Tikhonov, lorsque $p=2$. Le second terme permet d'introduire un *a priori* sur la

parcimonie spatiale des sources. L'équation (5), peut être résolue avec l'algorithme itératif IRLS (Iteratively Reweighted Least Squares) [8] et le paramètre de régularisation η est définie suivant Antoni [9]. Cette approche a l'avantage de ne pas être sujette aux effets de lobes, cependant, elle peut être plus sensible aux erreurs de mesures. L'objectif de la section suivante est de proposer un algorithme génétique pour améliorer les résultats de formation de voies, de déconvolution et de problème inverse en optimisant la géométrie de l'antenne.

2 Optimisation d'antenne par algorithme génétique

Dans cette communication, le choix s'est porté sur un algorithme génétique pour optimiser la forme de l'antenne. Ces derniers découlent de la théorie de l'évolution de Darwin [10]. La première étape consiste à créer une population initiale composée de N_{ind} individus. Chaque individu correspond à une géométrie d'antenne et est composé de $N_{gène}$ gènes. Chaque gène représente la position d'un capteur. Les individus sont alors initialisés en effectuant un tirage aléatoire dans une loi uniforme. Une fois initialisée, la population est évaluée en fonction d'un ou plusieurs critères et les individus sont classés suivant leurs performances. Les individus les plus pertinents sont conservés pour former la génération suivante. Afin d'ajouter de la diversité dans la population et d'éviter de converger vers un extremum local, certains individus, choisis aléatoirement, subissent une mutation.

2.1 Formation de voies : effets de lobe

Le résultat de formation de voies est déterminé par le pouvoir de résolution de l'antenne et le niveau maximum des lobes secondaires [11, 6]. Le pouvoir de résolution (C_{ouv}) caractérise la capacité de l'antenne à séparer spatialement deux sources proches. Ce paramètre dépend directement de la largeur du lobe principal à -3dB . Le Courtois *et al.* proposent d'estimer la capacité d'ouverture de l'antenne en calculant le nombre de points du plan de focalisation correspondant à l'intersection entre un plan à -3 dB et le lobe principal [11]

$$C_{ouv} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \begin{cases} 1 & \text{si } |\tilde{y}(i, j)|^2 \geq -3\text{dB}, \\ 0 & \text{si } |\tilde{y}(i, j)|^2 < -3\text{dB}, \end{cases} \quad (7)$$

avec N_x et N_y les nombres de points de focalisation suivant x et y . De manière générale, plus l'envergure de l'antenne est grande, plus le pouvoir de résolution est important.

Le diagramme de directivité de l'antenne comprend des lobes secondaires dont les amplitudes peuvent être plus importantes que celle du lobe principal, ce qui peut rendre difficile l'interprétation des cartographies acoustiques. Dans la littérature, l'influence des lobes secondaires est caractérisée par le paramètre *MSL* (*maximum sidelobe level*) [6] qui exprime la dynamique maximale, en dB, entre les amplitudes du lobe prin-

cipal (A_{lp}) et du lobe secondaire le plus important (A_{ls}),

$$MSL = 20 \log_{10}(C_{msl}) \text{ avec } C_{msl} = \frac{A_{lp}}{A_{ls}}. \quad (8)$$

Plus la densité de capteurs est grande, plus la dynamique entre le lobe principal et les lobes secondaires est grande. On peut également introduire un critère mixte C_{ouv}/C_{msl} qui va permettre de trouver un compromis entre effets de lobes et ouverture de l'antenne (antenne polyvalente).

2.2 iESM : conditionnement

Le méthode inverse iESM ne souffre pas d'effets de lobes mais est sensible à la qualité du conditionnement de la matrice \mathbf{G} . Plus la valeur du conditionnement est faible, moins la matrice est sensible aux erreurs lors de l'inversion du problème. Dans le cas où l'on cherche à résoudre l'équation (5), la sensibilité de la solution \mathbf{q} aux erreurs dans \mathbf{G} ou \mathbf{p} dépend du conditionnement de la matrice \mathbf{G} et s'exprime par

$$C_{cond} = \|\mathbf{G}\|_2 \|\mathbf{G}^\dagger\|_2, \quad (9)$$

avec \mathbf{G}^\dagger la pseudo-inverse de \mathbf{G} . Les paramètres influençant le conditionnement de la matrice ont été mis en avant par Nelson *et al.* dans le cas où le nombre de capteurs est égal au nombre de sources équivalentes à identifier [7]. Cependant, le cas sous-déterminé n'a pas été évoqué et fait l'objet de cette communication. Dans la suite, le plan de focalisation et le plan de reconstruction des sources équivalentes sont identiques.

2.3 DAMAS : vitesse de convergence

La méthode de déconvolution DAMAS est un processus itératif généralement coûteux en temps de calcul. Il s'agit de choisir la géométrie d'antenne qui améliore la vitesse de convergence de l'algorithme. Le critère C_{damas} est basé sur les pentes des courbes de convergence.

3 Simulations numériques

La section suivante met en avant l'influence de la géométrie d'antenne sur les résultats de formation de voies, de déconvolution (DAMAS) et de problème inverse (iESM). La simulation comprend 2 sources acoustiques monopolaires décorréliées. Les antennes sont composées de 18 capteurs. La célérité du son dans l'eau est fixée à 1500 m/s . Le plan de focalisation est centré sur l'antenne et cette dernière a une envergure limitée à 52 cm suivant x et 67 cm suivant y .

3.1 Formation de voies : effets de lobes

La Figure 1 met en avant les résultats de formation de voies en fonction des critères C explicités précédemment. Il est intéressant de noter ici que l'antenne polyvalente [Figure 1 (c)] permet d'avoir une bonne résolution spatiale tout en conservant des lobes secondaires faibles. Alors que l'optimisation suivant le critère C_{damas} induit des effets de lobes importants [Figure 1 (e)], ces derniers peuvent être réduits en utilisant le critère $C_{ouv}/(C_{msl} C_{damas})$.

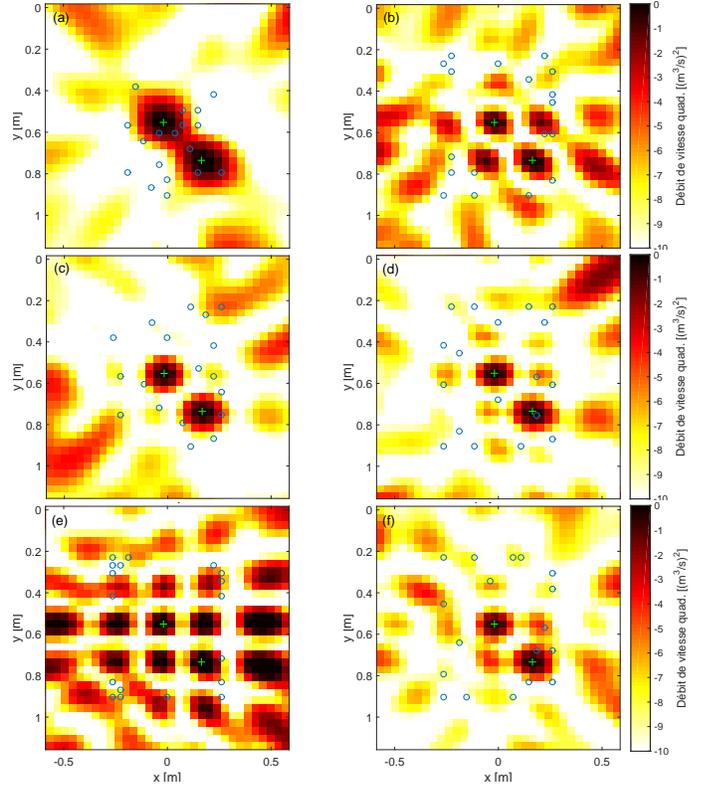


Figure 1: Résultat de formation de voies dans le cas d'une antenne optimisée suivant les critères : (a) C_{msl} , (b) C_{ouv} , (c) C_{ouv}/C_{msl} , (d) C_{cond} , (e) C_{damas} et (f) $C_{ouv}/(C_{msl} C_{damas})$ à la fréquence de 10 kHz, positions des capteurs (○) et positions des sources (+).

3.2 DAMAS : vitesses de convergence

L'algorithme de déconvolution DAMAS, basé sur la méthode de Gauss-Seidel, converge généralement lentement. L'influence de la géométrie d'antenne sur la vitesse de convergence de l'algorithme de déconvolution est étudiée Figure 2. Le critère de convergence C_{damas} est introduit et correspond aux coefficients directeurs des courbes présentées Figure 2. Il est clair dans ce cas, que la vitesse de convergence dépend de la géométrie d'antenne et que des antennes polyvalente ou avec des effets de lobes secondaires faibles dégrade la vitesse de convergence de la méthode. L'antenne de capteurs optimisée suivant le paramètre C_{damas} permet d'avoir une meilleure vitesse de convergence, ce qui réduit significativement le nombre d'itérations nécessaire mais rend plus compliqué l'interprétation du résultat de formation de voies. Le critère $C_{ouv}/(C_{msl} C_{damas})$ permet de faire un compromis entre les effets de lobe et la vitesse de convergence de DAMAS.

3.3 iESM : robustesse

Dans cette partie, le gain, en matière de robustesse de la méthode iESM, apporté par une antenne optimisée suivant C_{cond} est étudié. La figure 3 représente l'évolution de l'erreur relative en fonction de la fréquence et du RSB. L'optimisation permet no-

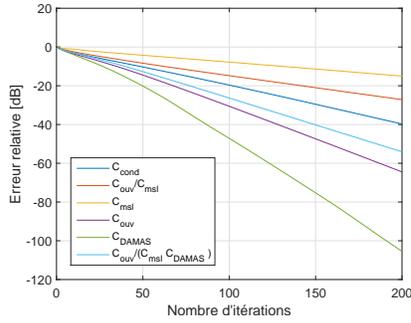


Figure 2: Évolution de l'erreur relative (courbe de convergence) sur le résultat de déconvolution en fonction du nombre d'itérations pour des géométries d'antenne optimisées suivant les 6 critères proposés et à la fréquence de 10 kHz.

tamment d'améliorer la méthode iESM en basses fréquences. Cette optimisation peut s'appliquer directement aux méthodes issues de la littérature qui nécessitent d'inverser une matrice [5, 7, 9].

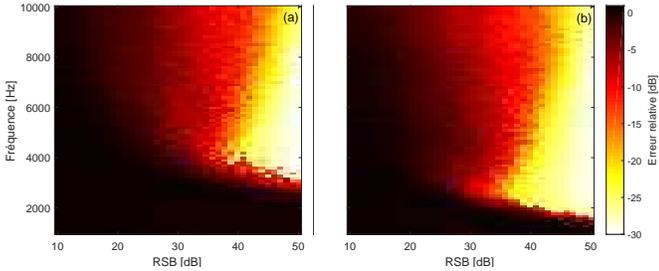


Figure 3: Évolution de l'erreur relative de la solution estimée par iESM en fonction de la fréquence et du RSB, pour une antenne optimisée suivant les critères (a) C_{msl} et (b) C_{cond} .

4 Conclusions

Un algorithme génétique visant à déterminer la géométrie optimale d'une antenne de capteurs est proposé et appliqué aux méthodes de formation de voies, de déconvolution DAMAS et à la méthode d'identification iESM. Les résultats de simulation mettent en avant que la formation de voies peut être améliorée en faisant un compromis entre le niveau des lobes secondaires et la largeur du lobe principal. Les résultats de déconvolution montrent qu'une antenne optimale suivant les critères de formation de voies n'est pas forcément optimale pour la déconvolution. En effet, la vitesse de convergence de DAMAS dépend de la géométrie de l'antenne et semble converger plus rapidement lorsque l'antenne est optimisée pour minimiser la largeur du lobe principal. À l'inverse une antenne optimisée pour réduire les effets de lobes secondaires conduit à une convergence plus lente. Un critère basé sur la vitesse de convergence de la méthode DAMAS est proposé et montre que le résultat de déconvolution n'est pas directement lié à la qualité du résultat de formation de voies mais dépend de la géométrie de l'antenne. Enfin, une simulation basée sur la méthode de Monte-Carlo montre que la méthode iESM peut gagner en robustesse si l'antenne est optimisée pour minimiser le conditionnement du problème inverse.

Remerciements

Ces travaux sont financés par la DGA à travers une bourse de thèse DGA.

References

- [1] A. Moffet. Minimum-redundancy linear arrays. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 16(2):172–175, 1968.
- [2] A. Malgouzar, M. Snellen, P. Sijtsma, and D. Simons. Improving beamforming by optimization of acoustic array microphone positions. In *Proceedings of 6th BeBec*, pages 1–24, 2016.
- [3] T. F. Brooks and W.M. Humphreys. A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays. *Journal of Sound and Vibration*, 294(45):856 – 879, 2006.
- [4] B. Oudompheng, A. Pereira, C. Picard, Q. Leclere, and B. Nicolas. A theoretical and experimental comparison of the iterative equivalent source method and the generalized inverse beamforming. In *Proceedings of 5th BeBec*, pages 1–24, 2016.
- [5] K.-L. Liu M. R. Bai, J.-H. Lin. Optimized microphone deployment for near-field acoustic holography: To be, or not to be random, that is the question. *Journal of Sound and Vibration*, 329, 2010.
- [6] H. L. Van Trees. *Optimum Array Processing (Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part IV)*. Wiley-Interscience, 2002.
- [7] P.A. Nelson and S.H. Yoon. Estimation of acoustic source strength by inverse methods: Part I, conditioning of the inverse problem. *Journal of Sound and Vibration*, 233(4):639–664, 2000.
- [8] P. J. Green. Iteratively reweighted least squares for maximum likelihood estimation, and some robust and resistant alternatives. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, pages 149–192, 1984.
- [9] J. Antoni. A bayesian approach to sound source reconstruction: Optimal basis, regularization, and focusing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(4):2873–2890, 2012.
- [10] C. Darwin. *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*. Murray, London, 1859.
- [11] F. Le Courtois, J.-H. Thomas, F. Poisson, and J.-C. Pascal. Genetic optimisation of a plane array geometry for beamforming. Application to source localisation in a high speed train. *Journal of Sound and Vibration*, 371:78 – 93, 2016.