HAL
open science

Optimisation par algorithme génétique de la géométrie d'antenne pour la localisation de sources

Florent Le Courtois, Jean-Claude Pascal, Jean-Hugh Thomas, Franck Poisson

To cite this version:

Florent Le Courtois, Jean-Claude Pascal, Jean-Hugh Thomas, Franck Poisson. Optimisation par algorithme génétique de la géométrie d'antenne pour la localisation de sources. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00542609

HAL Id: hal-00542609

https://hal.science/hal-00542609v1

Submitted on 3 Dec 2010

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.

10ème **C**ongrès **F**rançais d'**A**coustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Optimisation par algorithme génétique de la géométrie d'antenne pour la localisation de sources

Florent Le Courtois[1,2,+], Jean-Claude Pascal[2,3], Jean-Hugh Thomas[2,3], Franck Poisson[1]

[1] Direction Innovation et Recherche, 45 rue de Londres, 75379 Paris Cedex 08

[2] Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (UMR-CNRS 6613), rue O. Messiaen, 72085 Le Mans

[3] École Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans, rue Aristote, 72085 Le Mans

[+] florent.le_courtois@sncf.fr

La caractérisation des sources sonores par traitement d'antenne, en niveau, en spectre et en localisation sur le matériel ferroviaire en mouvement demande de plus en plus de précision et de justesse. En antennerie, la position des capteurs définit les propriétés de l'antenne et ainsi les performances de la mesure. L'objectif du travail est de disposer d'un outil permettant de concevoir une antenne en fonction des besoins et du contexte de la mesure. La largeur du lobe principal et l'atténuation des lobes secondaires sont les principaux critères de performances identifiés. L'objectif est alors de déterminer les géométries d'antenne permettant de satisfaire au mieux ces critères. L'optimisation est réalisée par un algorithme génétique. Une population d'antennes est générée en plaçant aléatoirement des microphones à différents emplacements prédéfinis suivant un maillage fin de forme carrée, garantissant une mise en oeuvre assez simple. L'optimalité de chaque antenne est évaluée selon un ou plusieurs critères afin d'obtenir un classement des antennes testées. L'algorithme crée une nouvelle population d'antennes à partir des antennes les plus mauvaises mais en disposant des ensembles de capteurs dans la configuration des meilleures antennes, les capteurs étant choisis aléatoirement. Cette nouvelle population d'antennes est classée à son tour. Le processus est répété sur plusieurs itérations : la population converge vers une antenne optimale, censée être la solution du problème. L'article présente le principe du maillage des positions possibles pour les capteurs. Le fonctionnement de l'algorithme est également détaillé et sa robustesse est testée sur cent exécutions. Enfin, une simulation de localisation de source par ces antennes illustre la pertinence de l'optimisation réalisée.

1 Introduction

Aujourd'hui, le respect des réglementations de bruit à l'émission du matériel ferroviaire est atteint en simulant le bruit de passage pour différentes combinaisons de sources. La fiabilité de ces résultats dépend de la caractérisation des sources sur le train faîtes en amont par antennerie [1]. Les réglementations de plus en plus restrictives nécessitent une caractérisation des sources de plus en plus juste et précise. Pour répondre à ces besoins naissants, une nouvelle méthode d'antennerie et une nouvelle géométrie vont être définies.

Cet article présente les résultats d'optimisation de géométrie par algorithmes génétiques. Dans un premier temps, la méthode de formation de voie est introduite, la notion de diagramme de directivité est explicitée et ses aspects qualitatifs y sont discutés. Ensuite la manière dont la géométrie d'antenne est optimisée par algorithme génétique est présentée. Enfin les résultats des antennes issues des optimisations sont comparés avec des résultats d'antennes classiques.

2 Formation de voie

En considérant un champ de pression stationnaire et un milieu de propagation homogène et isotrope [2], le milieu de propagation agit comme un filtre linéaire, la pression au capteur n s'écrit

$$p_n(t) = \sum_{i=1}^{N_s} s_i(t) * h_{in}(t), \tag{1}$$

avec

- $s_i(t)$ signal émis par la source i ;
- N_s est le nombre de sources à caractériser ;
- $h_{in}(t)$ est la fonction de transfert due à la propagation en espace libre sur la distance r_{in} entre la source i et le capteur n ;
- $p_n(t)$ pression acoustique mesurée par le microphone n ;
- $*$ est le produit de convolution.

L'expression de $h_{in}(t)$ dépend des hypothèses de propagation choisies ; par exemple pour une propagation en ondes sphériques

$$h_{in}(,t) = \frac{\delta(t - r_{in}/c)}{4\pi r_{in}} \tag{2}$$

où r_{in} est la distance du $n^{\text{ième}}$ capteur à la position de la source i.

La formation de voie, $x_i(t)$, est une technique de recombinaison des signaux $p_n(t)$ issus d'une antenne de N

capteurs (comme l'exemple de la Figure 1) pour la localisation de sources. Ces signaux sont déphasés et sommés de manière à focaliser l'antenne [3, 4]

$$x_i(t) = \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N} p_n(t) * w_{in}(t) * \delta(t + 2r_{in}/c), \qquad (3)$$

$w_{in}(t)$ permet de focaliser vers la source i et conduit ainsi à estimer la pression acoustique rayonnée par la source i. N_i est une constante de normalisation de manière à avoir $x_i(t) \approx s_i(t)$.

FIG. 1: Exemple d'antenne composée de deux étoiles encastrées.

Pour une bande de fréquence étroite centrée sur $f = \frac{\omega}{2\pi}$, la tranformée de Fourier de l'équation 3 devient

$$X_i(\omega) = \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N} P_n(\omega) W_{in}^*(\omega). \qquad (4)$$

L'expression 4 peut alors se mettre sous forme vectorielle

$$X_i = \frac{1}{N_i} \mathbf{W}_i^H \mathbf{P}, \qquad (5)$$

$\mathbf{W}_i$ est le vecteur de pointage (ou vecteur de pilotage ou *steering vector*) de dimension N

$$\mathbf{W}_i = \begin{bmatrix} W_{i1} \\ W_{i2} \\ \vdots \\ W_{iN} \end{bmatrix} = \mathbf{H}_i = \begin{bmatrix} H_{i1}(\omega) \\ H_{i2}(\omega) \\ \vdots \\ H_{iN}(\omega) \end{bmatrix}, \qquad (6)$$

$\mathbf{P}$ le vecteur des N mesures de pression par l'antenne pour la pulsation ω

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_N \end{bmatrix} \qquad (7)$$

et ^{H} désigne le transposé conjugué. $\mathbf{H}_i$ est le vecteur des transformées de Fourier du filtre $h_{in}(t)$.
La focalisation de la mesure équivaut à un filtrage spatial dont la représentation est le diagramme de directivité

$$D_0 = |\mathbf{W}_i^H \mathbf{H}_0|^2. \qquad (8)$$

Un diagramme de directivité d'antenne en étoile est représenté sur la Figure 2 en fonction des angles d'incidence θ et ϕ, respectivement l'azimut et l'élévation dans un repère de coordonnées sphériques. Le niveau maximal en $\theta_0 = 0$ et en $\phi_0 = 0$ est le lobe principal et indique la direction dans laquelle est focalisée l'antenne, correspondant au filtre $\mathbf{H}_0$. Les diagrammes de directivité sont tracés en décibels par rapport à la valeur du lobe principal.

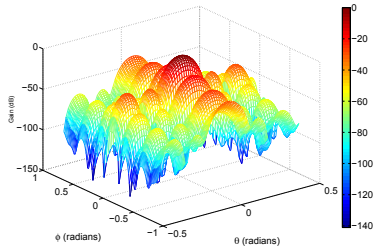

FIG. 2: Exemple de diagramme de directivité pour une antenne en étoile, pour une antenne focalisée en face, tracés en fonction des angles ϕ et θ.

Le lobe principal estime la pression acoustique rayonnée au point de focalisation. Les lobes secondaires vont intégrer les niveaux de pression rayonnés dans des directions pour lesquelles l'antenne n'est pas focalisée ; l'estimation du niveau est donc faussée par ces lobes. Les principales qualités d'une antenne sont :

- son pouvoir de séparer deux sources proches (capacité discriminante), quantifié par son ouverture (la surface d'un plan à -3 dB délimitée par le lobe principal), plus l'ouverture est petite plus l'antenne est discriminante ;
- son pouvoir d'estimer justement la pression acoustique rayonnée, c'est-à-dire un faible niveau des lobes secondaires.

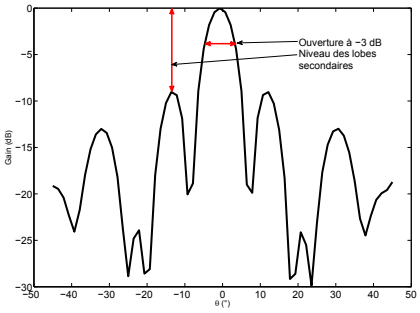

FIG. 3: L'ouverture du lobe principal et le niveau des lobes secondaires sont des indicateurs de qualité du filtrage spatial.

Ces deux propriétés sont représentées sur la Figure 3, diagramme de directivité tracé dans le plan en fonction de l'angle d'incidence θ. D'une manière générale les propriétés du diagramme de directivité dépendent :

- du modèle de propagation utilisé, *a priori* à choisir en fonction des conditions de mesure ;
- du point de focalisation ;
- de la position des capteurs, pouvant être optimisée.

Nous nous proposons d'utiliser un algorithme génétique pour placer les capteurs de façon optimale.

3 Optimisation des performances de l'antenne

Explorer l'ensemble des solutions d'antennes possibles dans le but de trouver la plus optimale est rédhibitoire. Les algorithmes génétiques offrent une alternative efficace pour la résolution de ce type de problème [5, 6]. De plus leur aspect non-déterministe permet la recherche d'extrema globaux [7, 8]. Cette méthode se base sur les travaux de Darwin [9] :

- les individus diffèrent les uns des autres ;
- les individus les plus adaptés survivent ;
- les gènes des individus les plus adaptés sont transmis aux générations suivantes.

Considérons qu'un individu soit une antenne possible et que son patrimoine génétique soit l'ensemble des microphones à positionner. Les critères d'adaptation répondent aux besoins introduits précédemment :

- une antenne discrimininante caractérisée par un lobe principal de faible ouverture, l'évaluation de l'ouverture est présentée en Figure 4 ;
- le rejet des lobes secondaires, calculé comme la différence en décibels entre le niveau du lobe principal et celui du lobe secondaire le plus important (nommé *msl* [3], pour *Maximum Sidelobe Level*), comme indiqué en Figure 5 ;
- un critère combiné, produit des deux précédents pour une antenne polyvalente ;
- le leakage, rapport de l'énergie des lobes secondaires sur celle du diagramme de directivité. Il s'agit d'une autre approche de minimisation de l'effet des lobes secondaires.

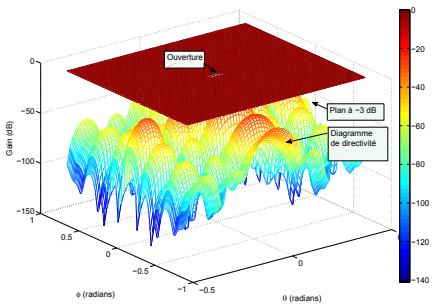

FIG. 4: L'ouverture est définie comme la surface d'intersection d'un plan à -3dB et du lobe principal. L'ouverture doit être la plus petite possible pour une antenne discriminante.

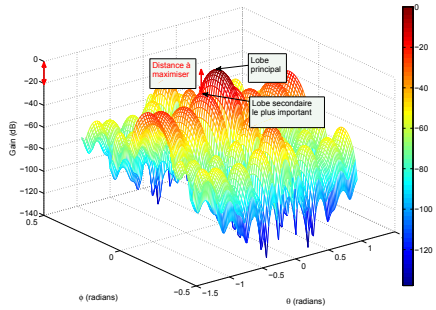

FIG. 5: Évaluation de l'influence des lobes secondaires en mesurant la différence en décibels entre le niveau du lobe principal et celui du lobe secondaire le plus important (*msl*).

Pour cette étude les positions que peuvent occuper les microphones sont définies comme les nœuds du maillage discret présenté en Figure 6. Ce maillage est construit à partir d'une bande de fréquences d'utilisation de l'antenne $[f_{\min}\ f_{\max}]$, de manière à ce que :

- le pas intercapteur d soit égal à la moitié de la plus petite longueur d'onde, soit $d = \dfrac{\lambda_{\min}}{2} = \dfrac{c}{2f_{\max}}$;
- l'envergure de l'antenne L soit égale au multiple de d le plus proche du double de la longueur d'onde maximale, $L = \alpha d$, $\alpha \in \mathbb{N}$ et $L \approx 2\lambda_{\max} = 2\dfrac{c}{f_{\min}}$.

Cette configuration permet

$$C^{N}_{(\frac{L}{d}+1)^2} = \frac{(\frac{L}{d}+1)^2!}{((\frac{L}{d}+1)^2 - N)!N!} \tag{9}$$

antennes possibles ; par exemple pour pour une bande de fréquences de [200 700] Hz avec 29 capteurs à placer, il y a $\dfrac{(\frac{3.1577}{0.2429}+1)^2!}{((\frac{3.1577}{0.2429}+1)^2 - 29)!29!} = 3.82 \times 10^{34}$ combinaisons.

Le déroulement de l'algorithme est détaillé sur la Figure 7. La première phase consiste en la génération d'une population, M antennes sont créées en disposant N microphones aléatoirement sur la grille de la Figure 6. Les diagrammes de directivité de chacune de ces antennes sont calculés afin de classer les antennes suivant leur optimalité vis à vis d'un des critères définis précédemment. Les positions des microphones des meilleures antennes sont redistribuées au hasard aux antennes moins performantes, c'est le croisement. La mutation consiste à remplacer aléatoirement une position de microphone par une nouvelle, elle aussi tirée au hasard. Ce phénomène permet de renouveler le patrimoine génétique. Les opérations de croisement et de mutation son schématisées sur la Figure 8. Les diagrammes de directivité de la nouvelle population d'antenne sont calculés afin d'établir le nouveau classement selon le critère d'optimalité choisi. Le processus est répété jusqu'à ce qu'une condition de fin soit atteinte, arbitrairement nous choisissons de stopper l'algorithme au bout de 100 itérations.

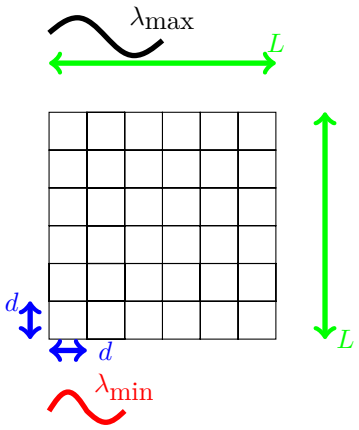

FIG. 6: Définition du maillage d'antenne grâce à la bande de longueurs d'onde d'utilisation [λ_{min} λ_{max}]. Les capteurs se positionnent sur n'importe quel nœud du maillage.

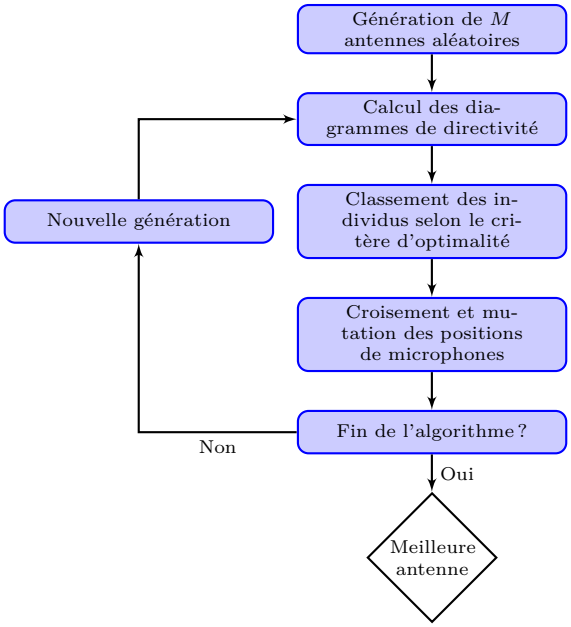

FIG. 7: Déroulement d'un algorithme génétique.

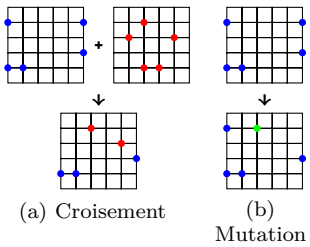

FIG. 8: (a) Détail d'un croisement, deux antennes échangent leurs positions de microphones pour en générer une troisième, et (b) d'une mutation, une position de microphone est remplacée par une autre tirée au hasard.

4 Résultats

Cette section présente d'une part les géométries trouvées par l'algorithme et vise à associer le critère et la disposition des capteurs à suivre, d'autre part les performances des antennes pour la détection d'une source. Ces performances sont comparées avec celles d'antennes classiques. Les antennes sont optimisées pour la gamme [200 700] Hz, avec 29 microphones.

4.1 Géométries

Pour chaque critère de sélection, l'algorithme est exécuté 100 fois pour obtenir 100 géométries optimisées. Pour comprendre les géométries liées à chaque optimisation de critère, les occurences d'occupation de chaque nœud de la figure 6 sont comptées pour les 100 géométries. Une représentation en niveaux de gris indique le nombre de fois que l'algorithme a choisi de placer un capteur sur ce nœud, avec une occurence maximale de 100. La meilleure géométrie des 100 est indiquée par des points rouges.
Ces tests permettent de vérifier la reproductibilité des résultats et d'associer une tendance de géométrie à chaque critère.

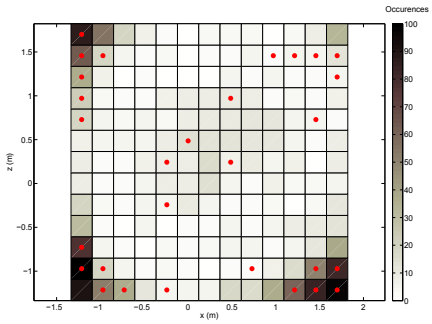

FIG. 9: Occurences des positions des capteurs pour 100 antennes optimisées en discrimination (niveaux de gris) et positions des capteurs de la meilleure antenne (points rouges).

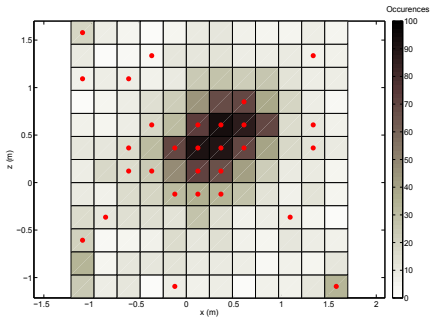

FIG. 10: Occurences des positions des capteurs pour 100 antennes optimisées en *msl* (niveaux de gris) et positions des capteurs de la meilleure antenne (points rouges).

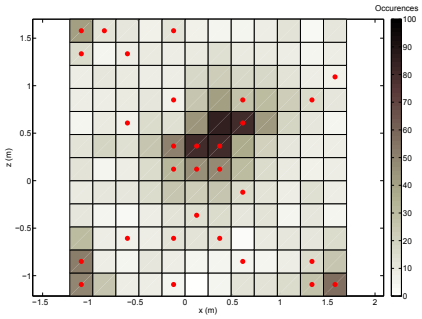

FIG. 11: Occurences des positions des capteurs pour 100 antennes optimisées en critère combiné (niveaux de gris) et positions des capteurs de la meilleure antenne (points rouges).

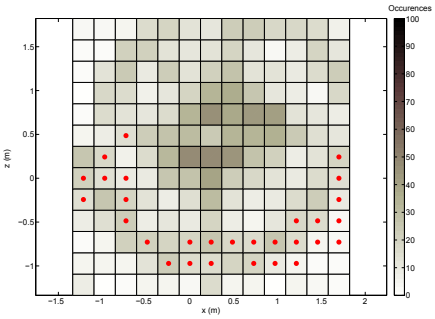

FIG. 12: Occurences des positions des capteurs pour 100 antennes optimisées en leakage (niveaux de gris) et positions des capteurs de la meilleure antenne (points rouges).

Figure 9, l'algorithme cherche à augmenter l'envergure pour obtenir une antenne discriminante, alors qu'au contraire pour minimiser l'influence des lobes secondaires les capteurs sont concentrés (cf Figures 10 pour la minimisation du *msl* et 12 pour le leakage) ; cette conclusion est à rapprocher des remarques de Underbrink [4] et de Nordborg *et al.* [10] sur le design d'antenne : plus les capteurs sont rapprochés plus le *msl* est petit et le lobe principal large, plus les capteurs sont éloignés plus le lobe principal est résolvant et le *msl* grand. On remarque Figure 12 que les positions des microphones correspondant à l'optimisation du leakage ne sont pas si souvent obtenues par l'algorithme (moins de 50 occurences au maximum). Il semble que deux géométries rivalisent. En particulier, une géométrie en demi-cercle se dessine. Elle est plus performante mais n'est pas souvent obtenue par l'algorithme génétique.
Les antennes optimisées en critère combiné sur la Figure 11 réalisent un compromis entre celles trouvées en optimisant la discrimination, Figure 9, et celles trouvées en optimisant le niveau du plus important lobe secondaire, Figure 10.

4.2 Performances

Une simulation de détection d'une source harmonique à 500 Hz, immobile et ponctuelle située en $[-0.5\ 1.5]$ permet de comparer les performances des antennes optimisées avec celles d'une antenne en étoile (huit branches avec deux pas différents $d_1 = 0.375$ m et $d_2 = 0.53$ m avec 29 capteurs) et d'une antenne en spirale (une branche à progression géométrique, 29 capteurs).
La localisation de la source par l'antenne discriminante

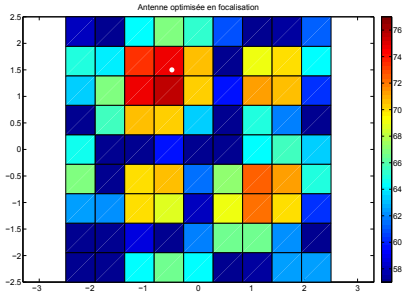

FIG. 13: Détection d'une source, située au point blanc, par l'antenne optimisée en discrimination.

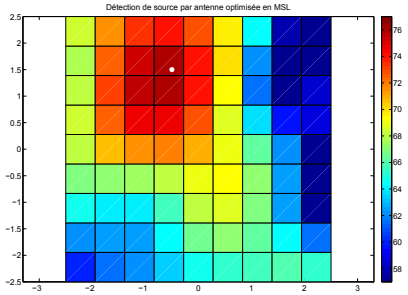

FIG. 14: Détection d'une source, située au point blanc, par l'antenne optimisée en *msl*.

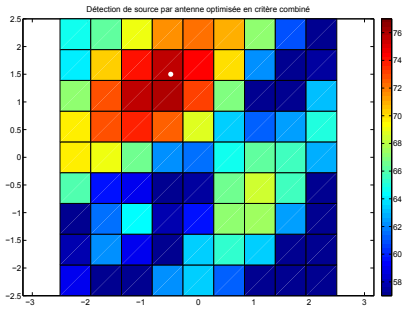

FIG. 15: Détection d'une source, située au point blanc, par l'antenne optimisée en critère combiné.

est plus précise (± 1 m), Figure 13, cependant des niveaux importants sont estimés là où il n'y a rien (75 dB pour la source et 70 dB pour des sources fictives aux coordonnées $[-1\ -1]$, $[-1\ 1.5]$ et $[1.5\ 1.5]$). Au contraire la minimisation de l'effet des lobes secondaires par réduction du *msl*, Figure 14, ou par diminution du leakage, Figure 16, offre un meilleur rapport signal sur bruit de fond (75 dB pour la source contre 65 pour le bruit) mais

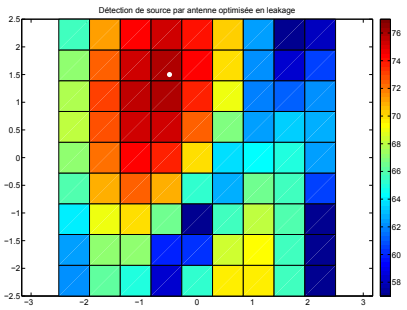

FIG. 16: Détection d'une source, située au point blanc, par l'antenne optimisée en leakage.

la localisation est à ±1.5 à 2 m près. L'antenne optimisée en critère combiné offre un bon compromis entre la localisation et le bruit de fond.

La détection par antennes classiques, Figure 17 pour

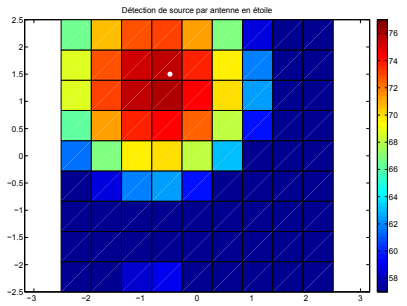

FIG. 17: Détection d'une source, située au point blanc, par l'antenne en étoile.

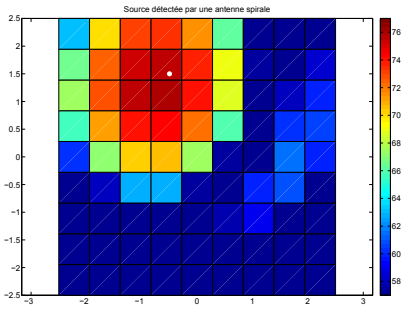

FIG. 18: Détection d'une source, située au point blanc, par l'antenne en spirale.

l'antenne en étoile et 18 pour l'antenne en spirale, est moins juste (la tâche de localisation mesure 2 à 3 m de diamètre) mais le niveau du bruit de fond est relativement faible et homogène (moins de 60 dB).

Cette comparaison valide l'intérêt de l'optimisation, le gain apporté en précision pour la localisation est significatif même en choisissant le compromis de l'antenne optimisée en critère combiné. D'autre part les limites de l'optimisation monocritère sont montrées, des propriétés importantes des antennes en spirale et en étoile (l'homogénéité de la cartographie du bruit, niveau du bruit de fond, le respect de la géométrie de la source...) ne sont pas pris en compte pour l'optimisation d'antenne.

5 Conclusion

Cette étude avait pour objet de disposer d'un outil permettant la définition d'une géométrie d'antenne à partir de différents besoins exprimés sur le diagramme de directivité. L'optimisation de la géométrie a été réalisée au moyen d'un algorithme génétique.

Plusieurs critères de qualité d'une antenne sont identifiés : un lobe principal discriminant, un faible *msl*, une antenne polyvalente et enfin un taux de leakage faible. Pour chacun de ces critères l'algorithme converge vers une géométrie :

- une antenne discriminante avec une grande envergure ;
- une antenne dont le *msl* est faible avec des capteurs centrés ;
- une antenne dont le taux de leakage est faible avec des capteurs disposés en cercle.

L'optimisation permet d'améliorer les performances de l'antenne lors de la détection de sources, particulièrement au niveau de la précision spatiale en comparaison avec des géométries d'antenne existantes.

Des méthodes de post-traitement vont pouvoir être adaptées aux propriétés spécifiques de ces antennes, notamment pour la caractérisation de sources en mouvement.

Références

[1] Poisson F., Letourneaux F., "Caractérisation de Sources au Passage de Trains", *Séminaire GdR Acoustique des Transports*, INRETS (20 mai 2008).

[2] Mermoz H., "Imagerie, Corrélation et Modèles", *Ann. Télécom.* n°31, (1976).

[3] Christensen J.J., Hald J., "Beamforming", *Technical Review* vol 1, Brüel & Kjær (2004).

[4] Underbrink J.R., "Aeroacoustic Phased Array Testing in Low Speed Wind Tunnels", in *Aeroacoustic Measurements*, T.J. Mueller (2002).

[5] Debert S., "Étude Numérique et Expérimentale d'Antennes Microphoniques Destinées à l'Imagerie Acoustique Passive Large Bande", *Rapport de Stage de Master 2*, Université Pierre et Marie Curie (2005).

[6] Holm S., Austeng A., Iranpour K., Hopperstad J.F., "Sparse Sampling in Array Processing", ch. 19 dans "Sampling Theory and Practice", *F. Maravasti Ed.*, Plenum (2001).

[7] Poli R., Langdon W.B., Mc Phee N.F., "A Field Guide to Genetic Programming", `http://lulu.com` (Mars 2008).

[8] Weise T., "Global Optimization Algorithms - Theory and Application", *Thomas Weise*, `http://www.it-weise.de/` (juin 2009).

[9] C. Darwin, "The origin of species by means of natural selection", *John Murray* (1872).

[10] Nordbord A., Wedemann J., Willenbrick L., "Optimum Array Microphone Configuration", *Proccedings of Internoise* (2000).