

CFA/VISHNO 2016

**Caractérisation de sources par antennerie acoustique :
aspects quantitatifs**Q. Leclere^a, A. Pereira^b, T. Le Magueresse^c et J. Antoni^d^aLabCom P3A, Bâtiment St. Exupéry 25 bis av. Jean Capelle, 69621 Villeurbanne,
France^bLaboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, 36, Avenue Guy de Collongue,
69143 Ecully, France^cMicrodB, 28 Chemin du Petit Bois, 69130 Ecully, France^dLVA, 25 bis av. Jean Capelle, 69621 Villeurbanne, France
quentin.leclere@insa-lyon.fr

LE MANS

La localisation de sources sonores par antennerie acoustique est une thématique largement traitée dans la littérature. De nombreuses méthodologies ont été développées, par des scientifiques issus de différentes communautés (traitement du signal, physique, mécanique ...) et pour des domaines d'application variés (acoustique sous-marine, vibro-acoustique, aéro-acoustique). Si les capacités des méthodes à localiser et séparer les sources ont été largement et systématiquement abordées, les aspects quantitatifs restent un point délicat, et ce pour plusieurs raisons. On peut tout d'abord mentionner l'inconvénient inhérent à l'antennerie qui est que le champ acoustique rayonné par la source n'est caractérisé que sur un angle solide souvent très restreint (angle solide couvert par l'antenne). Par ailleurs, les méthodes sont souvent exploitées au-delà de leurs limites (fixées par leurs hypothèses de base), on peut notamment citer la problématique de l'échantillonnage spatial en hautes fréquences, ou les propriétés de dé-corrélation des sources utilisées par certaines méthodes. L'objectif de cette communication est d'aborder dans ce contexte la problématique de quantification, dans un cadre méthodologique large (formation de voies, déconvolution, identification bayésienne, parcimonie...), sur des exemples simulés didactiques.

1 Identification de sources acoustiques

De nombreuses méthodes d'imagerie acoustique sont disponibles dans la littérature. On trouvera un recensement fourni (mais non exhaustif ...) des approches fréquentielles dans [1]. D'une manière générale, les méthodes sont basées sur la résolution du problème

$$\{p\} = [G]\{q\}, \quad (1)$$

où $\{p\}$ est le vecteur des quantités acoustiques mesurées en M points ($M \times 1$), $[G]$ la matrice de propagation ($M \times N$) et $\{q\}$ les amplitudes des sources ($N \times 1$) à reconstruire. $[G]$ dépend des formes d'ondes utilisées pour reconstruire le champ acoustique. De nombreuses méthodes se basent sur des ondes sphériques :

$$G_{mn} = \frac{j\rho ck}{4\pi r_{mn}} \exp(-jkr_{mn}), \quad (2)$$

où ρ , c , k , sont respectivement la densité du milieu, la célérité acoustique et le nombre d'onde, et où r_{mn} est la distance entre la source n et le capteur m . Dans ce cas, les amplitudes des sources $\{q\}$ sont les débits acoustiques des sources (en m^3/s) et $\{p\}$ les pressions acoustiques (en Pa).

1.1 Formation de voies et déconvolution

Les approches de type formation de voies les plus simples donnent une solution de la forme

$$\{q\}_{\text{beam}} = [G]^H \{p\}, \quad (3)$$

qui n'apporte qu'une information en terme de localisation de source, l'aspect quantitatif n'est pas respecté. La réintroduction de (1) dans (3) permet de poser le problème suivant

$$\{q\}_{\text{beam}} = [G]^H [G]\{q\}. \quad (4)$$

En faisant une hypothèse de sources décorréelées, cette équation peut être formulée en énergie

$$\{q|q^2\}_{\text{beam}} = [F]\{|q|^2\}, \quad (5)$$

avec

$$[F]_{ni} = \left\| \left[[G]^H [G] \right]_{ni} \right\|^2 \quad (6)$$

Les colonnes de $[F]$ représentent les fonctions d'étalement (Point Spread Functions). La résolution de (5) avec un contrainte de positivité (régularisante) est relativement robuste, elle peut être réalisée par différentes approches (Damas [2], NNLS [3]).

Les résultats obtenus de cette manière permettent d'accéder simplement aux puissances des sources, grâce à l'hypothèse de décorrélation :

$$W_n = \frac{\rho ck^2}{8\pi} |q_n|^2. \quad (7)$$

1.2 Méthodes inverses

Les méthodes inverses sont basées sur une pseudo-inverse régularisée au sens de Tikhonov du problème (1) :

$$\{q\}_{\text{tik}} = \left([G][G]^H + \eta^2 [I] \right)^{-1} \{p\}. \quad (8)$$

où le paramètre de régularisation η^2 permet d'obtenir un résultat robuste, généralement performant en terme de localisation, solution du problème de minimisation

$$\{q\}_{\text{tik}} = \text{Arg min} \left(\|\{p\} - [G]\{q\}\|^2 + \eta^2 \|\{q\}\|^2 \right) \quad (9)$$

Cependant, dans un contexte sous déterminé ($m \ll n$), cette approche peut mener à une sous-estimation importante des puissances de sources à cause de la contrainte de « moindre norme » imposée par la régularisation de Tikhonov [8,9]. Il est possible, pour à la fois améliorer les aspects localisation et quantification, d'ajouter une contrainte de parcimonie à la solution en remplaçant la pénalisation en norme L2 par une pénalisation en norme Lp :

$$\{q\}_{\text{spa}} = \text{Arg min} \left(\|\{p\} - [G]\{q\}\|^2 + \eta^2 \sum_n |q_n|^p \right) \quad (10)$$

La solution d'un tel problème peut être obtenue par moindres carrés itératifs (cf. [4,5,6]). Notons cependant que cet ajout d'information a priori doit refléter une certaine connaissance de la source à identifier (notamment la base de source dans laquelle la parcimonie est supposée).

2 Puissance acoustique d'un nuage de monopoles partiellement corrélés

La puissance acoustique d'une source ponctuelle ne dépend pas uniquement de son débit q_n , mais aussi de la pression acoustique générée en son centre par les $(N-1)$ autres sources corrélées, notée p_{0n} ([7,8]):

$$W_n = \frac{\rho ck^2}{8\pi} |q_n|^2 + \frac{1}{2} \Re(p_{0n} \overline{q_n}), \quad (11)$$

avec p_{0n} défini par

$$p_{0n} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N G_{ni} q_i, \quad (12)$$

où G_{ni} représente la fonction d'onde sphérique (Eq. 2) entre les positions des sources i et n . En combinant (11) et (12), on obtient

$$W_n = \Re\left(\overline{q_n} \{A_n\}^T \{q\}\right), \quad (13)$$

où $\{A_n\}$ un vecteur ($N \times 1$) dont le $i^{\text{ème}}$ terme A_{ni} est défini

$$A_{ni} = \frac{G_{ni}}{2} \text{ si } i \neq n,$$

par :

$$A_{ni} = \frac{\rho c k^2}{8\pi} \text{ si } i = n.$$

En cas de sources partiellement corrélées, les débits des sources estimés par méthode inverse sont obtenus sous la forme d'une matrice interspectrale $[S_{qq}]$ ($N \times N$) constituée des autospectres (diagonale) et interspectres (hors diagonale) des débits. Cette matrice peut être décomposée en différentes composantes décorréelées de sorte que

$$[S_{qq}] = \sum_{\alpha=1}^N \{q_{\alpha}\} \{q_{\alpha}\}^H. \quad (14)$$

L'application de (13) permet alors de déterminer les puissances pour chaque composante, pour ensuite les sommer sur les composantes :

$$W_n = \sum_{\alpha} \Re\left(\overline{q_{\alpha n}} \{A_n\}^T \{q_{\alpha}\}\right), \quad (15)$$

ce qui peut être exprimé directement à partir des quantités interspectrales :

$$W_n = \Re\left(\{A_n\}^T \{S_{qqn}\}\right), \quad (16)$$

où $\{S_{qqn}\}$ est la $n^{\text{ème}}$ colonne de la matrice interspectrale $[S_{qq}]$.

3 Illustration sur un cas académique simple

La configuration étudiée (Fig. 1) est volontairement simple, pour mettre en évidence les spécificités des différentes approches de reconstruction de source.

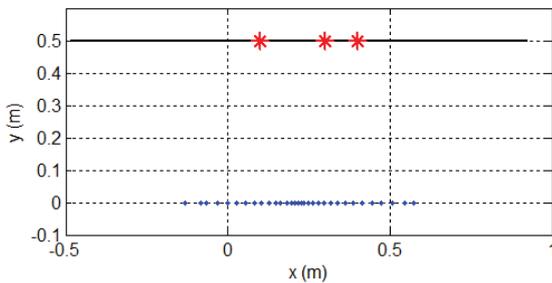


Figure 1: Configuration étudiée : positions des microphones (points bleus), positions des sources (étoiles rouges) et ligne de sources candidates (trait noir)

32 microphones (antenne linéaire avec pas non régulier, envergure 70cm) sont placés à 50cm de trois monopoles corrélés. Du bruit de mesure est ajouté aux simulations (RSB=20dB).

Les sources reconstruites sont tracées en Fig. 2. Dans tous les cas les positions des 3 sources introduites dans la simulation sont à peu près correctement localisées, avec cependant une incertitude en basse fréquence, notamment

pour la méthode de déconvolution qui pâtit de l'hypothèse de décorrélation des sources.

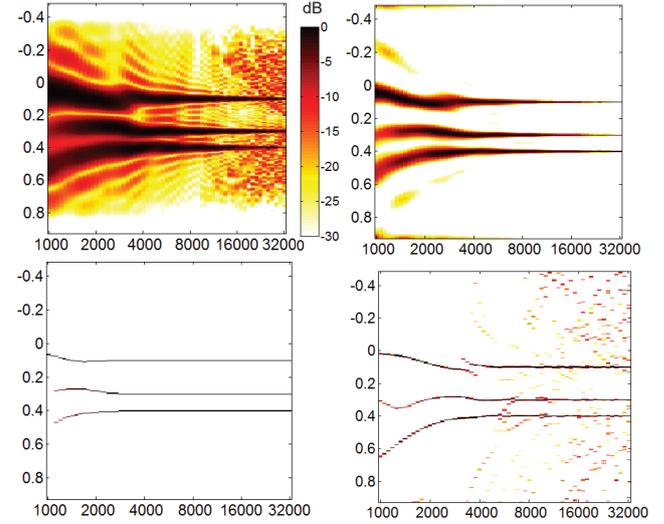


Figure 2: Sources reconstruites en fonction de la fréquence (abscisse) et de l'espace (ordonnée). Inverse Tikhonov (haut gauche), IRLS $p=1.1$, (haut droit) IRLS $p=0$ (bas gauche) et déconvolution - NLS (bas droit).

L'effet de la puissance de la norme pour la méthode inverse (2, 1.1, et 0) est très significatif et agit directement sur la distribution spatiale de la source, de plus en plus concentrée quand la puissance de la norme diminue.

Les puissances reconstruites par différentes méthodes sont tracées en fonction de la fréquence sur la figure 3.

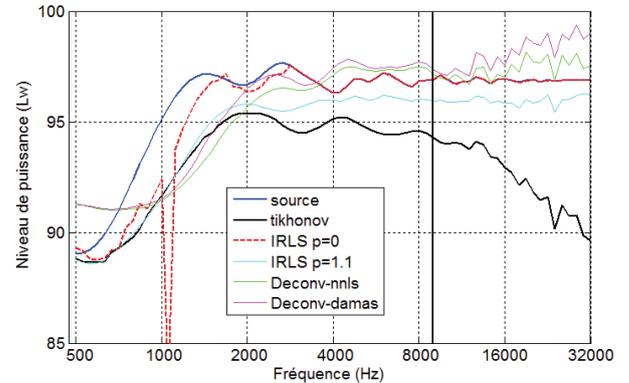


Figure 3: Puissances des sources reconstruites par différentes méthodes. Barre verticale : limite de Shannon pour le pas moyen de l'antenne.

Les méthodes de déconvolution donnent des résultats satisfaisants en termes de puissance reconstruite au-delà de 2kHz environ. Cela peut paraître surprenant, car dans ce cas les sources sont corrélées, en contradiction avec les hypothèses admises pour les approches de déconvolution. Cela illustre le caractère restrictif de cette hypothèse : d'un point de vue théorique, la composition énergétique dans le plan source (Eq. (5)) est valable si les sources sont décorréelées, mais également plus généralement si les fonctions d'étalement des sources réelles n'interfèrent pas, ce qui est le cas si elles ont des supports spatiaux disjoints. On peut vérifier que c'est le cas ici au-delà de 2kHz. Il est clair que la méthode inverse avec régularisation a tendance à sous-estimer la puissance de la source, de 2 à 3dB en dessous de la limite de Shannon, et de plus en plus

au-delà de cette limite. Pour comprendre ce résultat, les champs acoustiques rayonnés par la source et par la source reconstruite par méthode inverse avec régularisation de Tikhonov sont présentés en Fig. 4 (haut gauche et haut droit, respectivement).

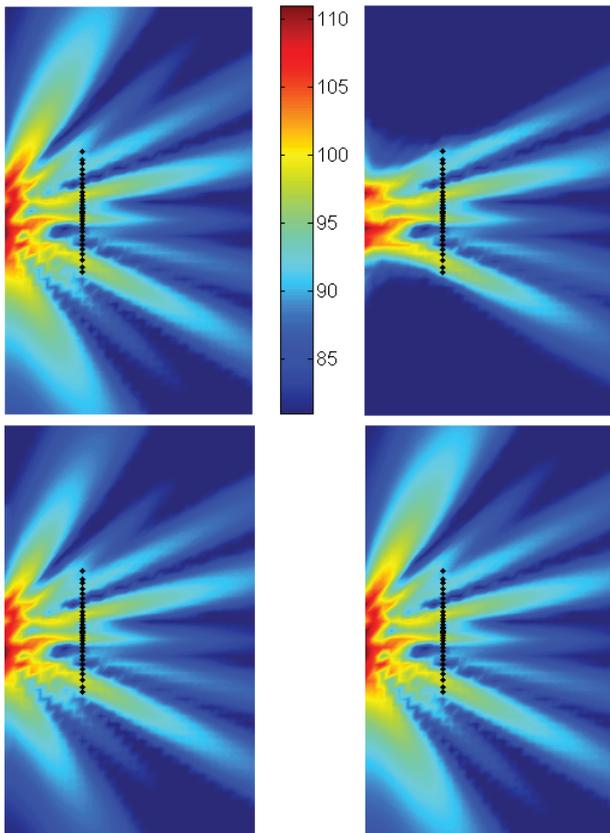


Figure 4: Niveaux de pression rayonnés en dB à 5kHz (dynamique 30dB) par la source réelle (haut gauche) et la source équivalente par méthode inverse Tikhonov (haut droit), IRLS (bas gauche : $p=1.1$, bas droit : $p=0$). La position des microphones de l'antenne est matérialisée par les points noirs.

Il est clair sur la Fig. 4 que le champ de pression est correctement reconstruit uniquement sur l'angle solide couvert par l'antenne. En dehors de cet angle, le niveau de pression est largement sous-estimé. Cela illustre un défaut important de l'approche inverse, qui est de reconstruire des sources ayant une directivité artificiellement forcée vers l'antenne. Dans notre illustration 1D, on peut considérer que la fraction de l'angle solide couvert par l'antenne est d'environ 60%. La sous-estimation de puissance pourrait donc être approximativement estimée à 2.5dB, ce qui correspond plutôt bien aux observations, dans une large bande de fréquence allant de 1 à 8kHz.

Au-delà de 8kHz, la sous-estimation empire, les champs rayonnés par la source originale et la source reconstruite sont représentés à 16kHz en Fig 5 (haut gauche et haut droit). On constate qu'en plus de générer un champ en direction de l'antenne seulement, le niveau de pression reproduit derrière l'antenne est sous-estimé. Il est à noter que dans cette bande de fréquence, la méthode inverse ne nécessite généralement plus de régularisation (le paramètre η^2 de l'Eq. (8) est choisi nul). Dans ce cas, la source reconstruite est la solution exacte (pas d'erreur de reconstruction) *de norme minimale* (à distinguer de la source réelle !). La distribution de source est reconstruite de

manière à obtenir des interférences constructives sur les positions microphones, de manière à minimiser les débits de sources nécessaires.

On constate sur les figures 4 et 5 (en bas) que l'utilisation d'une norme forçant la parcimonie de la source permet de solutionner le problème pour la configuration étudiée. Les champs reconstruits avec une norme $p=0$ sont extrêmement fidèles aux champs rayonnés par la source réelle.

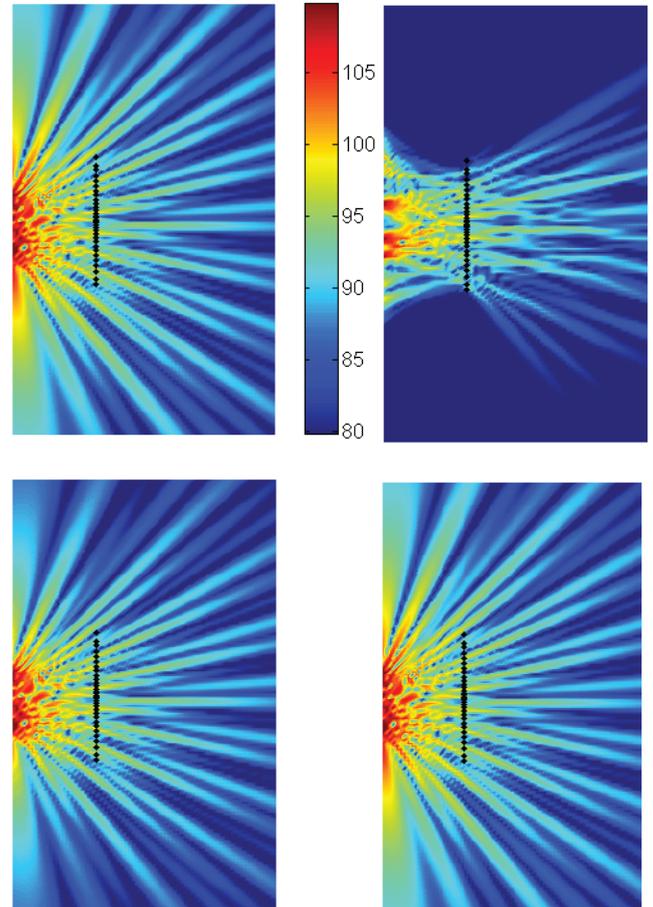


Figure 5: Niveaux de pression rayonnés en dB à 16kHz (dynamique 30dB) par la source réelle (haut gauche) et la source équivalente par méthode inverse Tikhonov (haut droit), IRLS (bas gauche : $p=1.1$, bas droit : $p=0$). La position des microphones de l'antenne est matérialisée par les points noirs.

5 Conclusion

L'estimation des puissances des sources par imagerie acoustique reste un sujet difficile, ce qui constitue toujours aujourd'hui un frein à l'utilisation de l'antennerie acoustique pour des aspects quantitatifs ou normatifs. Dans ce travail, nous avons pu illustrer les difficultés existantes, notamment la capacité des outils classiques à estimer correctement la puissance à travers l'antenne seulement, et ce dans les limites fréquentielles imposées par Shannon. Nous avons pu également montrer qu'il est possible de repousser ces limites en apportant une information a priori sur la nature plus ou moins parcimonieuse de la source. Les performances des méthodes deviennent cependant fortement dépendantes de la justesse de ces hypothèses : les illustrations proposées dans ce travail traitent un cas favorable (sources ponctuelles), on peut montrer que des difficultés apparaissent lorsqu'on traite des sources

étendues. Il est alors possible de travailler sur la base spatiale de représentation de la source (dictionnaire), sur laquelle la parcimonie sera la plus adaptée.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du LabCom P3A (ANR-13-LAB2-0011-01) au sein du Labex CeLyA de l'Université de Lyon, géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-10-LABX-0060/ ANR-11-IDEX-0007).

Références

- [1] Q. Leclère, A. Pereira, C. Bailly, C. Picard. *A unified formalism for acoustic imaging techniques: illustrations in the frame of a didactic numerical benchmark*. Proceedings of BeBeC 2016, Berlin, Germany.
- [2] T. F. Brooks and W. M. Humphreys, Jr. *A Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources (DAMAS) Determined from Phased Microphone Arrays*. In 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Manchester, Great Britain, May 10-12, 2004.
- [3] K. Ehrenfried and L. Koop. *Comparison of Iterative Deconvolution Algorithms for the Mapping of Acoustic Sources*, AIAA Journal, 45(7), 1584–1595, 2007.
- [4] I. Daubechies, R. DeVore, M. Fornasier, and C. S. Gunturk. *Iteratively reweighted least squares minimization for sparse recovery*. Communications on Pure and Applied Mathematics, 63(1), 1–38, 2010.
- [5] Q. Leclere, A. Pereira, and J. Antoni. *Une approche bayésienne de la parcimonie pour l'identification de sources acoustiques*. In Proceedings of CFA 2014. Poitier, France, 2014.
- [6] T. Suzuki. *L1 generalized inverse beam-forming algorithm resolving coherent/incoherent, distributed and multipole sources*. J. Sound Vib., 330, 5835–5851, 2011.
- [7] Q. Leclere, J.-L. Le Carrou, and F. Gautier. *Study of a concert harp's radiation using acoustic imaging methods*. In proceedings of Acoustics08. Paris, FRANCE, 2008.
- [8] A. Pereira. *Acoustic imaging in enclosed spaces*. Theses, INSA de Lyon, 2013
- [9] T. Le Magueresse. *Approche unifiée multi - dimensionnelle du problème d'identification acoustique inverse*. Ph.D. thesis, INSA de Lyon, 2016.