

Méthode de Déconvolution pour l'Imagerie des Sources en Mouvement Rapide

F. Le Courtois^a, J.-H. Thomas^a, F. Poisson^b et J.-C. Pascal^{a,c}

^aLaboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, UMR CNRS 6613, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, France

^bSNCF - Direction de l'Innovation et de la Recherche, 40 avenue des terroirs de France, 75611 Paris, France

^cEcole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans, Rue Aristote, 72085 Le Mans, France
jean-hugh.thomas@univ-lemans.fr

Afin de réduire la pollution sonore dans le domaine des transports, il est nécessaire d'avoir une connaissance précise des propriétés des sources de bruit en mouvement. Un moyen d'atteindre cet objectif est d'utiliser une antenne de microphones couplé à un traitement de formation de voies. Il repose sur l'hypothèse de sources ponctuelles et harmoniques : l'antenne est focalisée en un point de l'espace, les contributions venant des autres directions sont alors filtrées par la réponse de l'antenne présentant un lobe principal dans la direction de focalisation et des lobes secondaires. Plusieurs algorithmes de déconvolution ont été développés pour supprimer les contributions parasites. L'étude consiste à représenter la sortie de la formation de voies dans un plan espace-fréquence. Une approche adaptée pour supprimer les effets de la réponse de l'antenne et de la modulation Doppler est développée. La trajectoire et la vitesse du véhicule étant connues, la modulation Doppler et la réponse de l'antenne sont calculées à chaque instant pour chaque point de focalisation. La correction est réalisée itérativement par un algorithme de Gauss-Seidel. La méthode est étudiée sur des cas simulés et une application à la caractérisation des sources de bruit d'un TGV est présentée.

1 Introduction

La réduction de la pollution sonore est un enjeu majeur. En effet, une exposition importante peut engendrer une augmentation du stress et des problèmes de sommeil. Le bruit des transports est la principale composante de cette pollution. Pour apporter des solutions de réduction efficaces, une connaissance précise des caractéristiques des sources de bruit sur le véhicule en mouvement est nécessaire. Les traitements d'antenne sont généralement utilisés pour imager les véhicules; ils permettent d'obtenir une estimation des niveaux, des spectres et des positions des sources présentes. La formation de voies est un traitement consistant à avancer et sommer les signaux de sortie des microphones [1]. Cette méthode est robuste et facile à implémenter pour les véhicules au passage [2]. Les contributions des sources sont convoluées par le filtre spatial de l'antenne : le lobe principal indique le point de focalisation et des lobes secondaires minimisent les contributions des autres sources. L'expression de ce filtre, ou diagramme de directivité de l'antenne, dépend de la position des capteurs, des sources, de la fréquence et du modèle de propagation [3]. Le résultat de la formation de voies est néanmoins biaisé, le filtrage n'est pas parfait, les autres sources contribuent à l'estimation. Cette erreur peut générer des sources fantômes, rendant impossible l'interprétation quantitative des cartographies. Plusieurs méthodes de déconvolution ont été développées pour nettoyer les cartographies dans le cas de sources immobiles : CLEAN [4], DAMAS (*deconvolution approach for the mapping of acoustic sources*) [5] et ses variantes [6, 7] ou la régularisation ℓ_1 [8].

Dans le contexte de véhicules en mouvement rapide, l'effet Doppler introduit une modulation des fréquences émises. Deux approches principales sont considérées. La première consiste à focaliser l'antenne sur un point de passage et à négliger l'effet Doppler [9]. La seconde est la démodulation et consiste à focaliser l'antenne sur un repère se déplaçant avec le véhicule [10]. L'effet Doppler est supprimé mais les propriétés du filtrage changent au cours du suivi du véhicule, ce qui peut amener à mal estimer les propriétés de certaines sources [11]. Les méthodes de déconvolution sont généralisées pour cette approche dans [12], pour le cas où le véhicule passe loin de l'antenne. Les variations du diagramme peuvent alors être négligées.

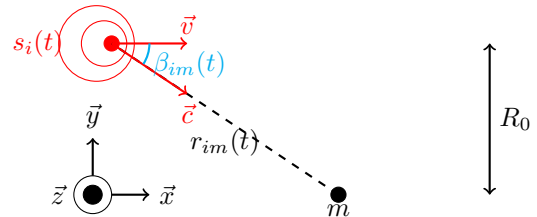


FIGURE 1 – Déplacement uniforme d'une source selon l'axe \vec{x} . La distance r_{im} entre la source i et le capteur m , $\beta_i(t)$ est l'angle entre la direction de déplacement et la direction d'incidence de l'onde acoustique.

Pour la caractérisation des sources en champ proche, cette variation ne peut pas être négligée [11]. L'objectif de ce travail est alors de développer une méthode de déconvolution, prenant en compte l'effet Doppler. Dans une première section, l'approche consistant à focaliser l'antenne sur un point fixe est présentée. L'effet Doppler est intégré dans la matrice de convolution. Ensuite, section 3, l'algorithme DAMAS [5] est adapté pour prendre en compte l'effet Doppler. Ainsi les contributions sont corrigées de l'estimation pour des fréquences différentes. Cette méthode est appliquée en simulation et pour une motrice de TGV. Ses performances sont comparées à celles des méthodes classiques.

2 Formation de voies et effet Doppler

Pour un ensemble de N_s sources s_i et une antenne de M capteurs, la pression reçue sur le $m^{\text{ième}}$ microphone s'écrit

$$p_m(t) = \sum_{i=1}^{N_s} s_i(t) * h_{im}(r_{im}, t), \quad (1)$$

où $h_{im}(r_{im}, t)$ est la réponse impulsionnelle associée à la propagation des ondes dans le milieu, r_{im} est la distance entre la $i^{\text{ème}}$ source et le capteur et $*$ désigne le produit de convolution. La réponse impulsionnelle définit un modèle de propagation des ondes. Pour une source en mouvement uniforme et rectiligne, $h_{im}(r_{im}, t)$ est un retard de propagation et une atténuation géométrique

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

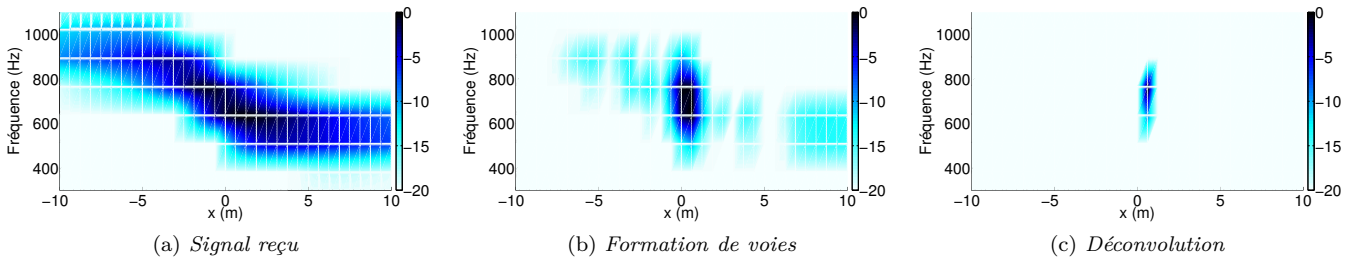


FIGURE 2 – Représentation dans un plan position-fréquence du passage d'une source harmonique à 700 Hz à 320 km/h (a) devant un microphone, (b) devant l'antenne focalisée et (c) après déconvolution.

avec c la célérité des ondes dans le milieu. À cause du mouvement des sources, r_{im} et h_{im} dépendent du temps. Pour une vitesse \vec{v} , le signal est alors modulé selon l'effet Doppler [13] en amplitude

$$A_{im}(t) = \frac{1}{4\pi r_{im}(t)(1 - Mach \cos(\beta_{im}(t)))^2}, \quad (3)$$

et en fréquence

$$f_m(t) = \frac{f_0}{1 - Mach \cos(\beta_{im}(t))}, \quad (4)$$

où f_0 la fréquence d'émission, $Mach = v/c$ est le nombre de Mach et $\beta_{im} = \vec{v}, \vec{c}$, avec \vec{c} pointant la direction source-capteur comme indiqué sur la figure 1. Pour une source harmonique à 800 Hz se déplaçant à 320 km/h, le signal reçu sur un microphone est représenté sur le plan espace-fréquence de la figure 2a. Quand la source se rapproche, la fréquence est augmentée et quand la source s'éloigne, elle est diminuée. Quand r_{im} est minimal, la modulation Doppler est nulle et l'amplitude est atténuée de $1/(4\pi r_{im})$.

La formation de voies est un traitement d'antenne qui consiste à compenser les effets de propagation [1]. L'antenne est focalisée en un point n en compensant les retards et atténuations

$$\hat{s}_n(t) = \sum_{m=1}^M p_m(t) * w_{nm}(r_{nm}(t), t), \quad (5)$$

$w_{nm}(r_{nm}(t), t)$ est le pointage du $m^{\text{ième}}$ capteur de l'antenne sur n , défini comme

$$\begin{aligned} w_{nm}(r_{nm}(t), t) &= \frac{1}{\Xi(t)} |h_{nm}(-r_{nm}(t), t)| \\ &= \frac{1}{\Xi(t)} \frac{\delta(t + r_{nm}(t)/c)}{4\pi r_{nm}(t)}, \end{aligned} \quad (6)$$

où $\Xi(t)$ est un terme de normalisation.

Généralement, pour la localisation de sources immobiles, n balaye les mailles du plan plan (\vec{x}, \vec{y}) pour y estimer l'énergie acoustique. Pour les sources mobiles, le plan se déplace devant l'antenne, n balaye uniquement l'axe vertical \vec{z} ; chaque instant correspond alors à une position $x = vt$, figure 3. Dans ce cas, la dépendance temporelle de r_{nm} est supprimée et l'équation (5) devient :

$$\hat{s}_n(t) = \sum_{m=1}^M p_m(t) * w_{nm}(r_{nm}, t), \quad (7)$$

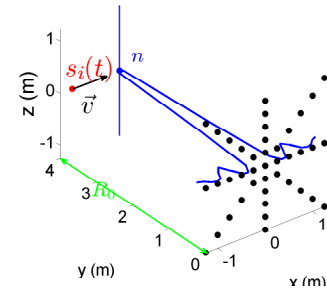


FIGURE 3 – Principe de la formation de voies au passage d'une source avec une antenne en étoile

avec

$$w_{nm}(r_{nm}, t) = \frac{1}{\Xi} \frac{\delta(t + r_{nm}/c)}{4\pi r_{nm}}, \quad (8)$$

où $\Xi = \sum_{m=1}^M 1/(4\pi r_{nm})^2$.

Les signaux captés par l'antenne de microphones sont représentés dans un espace temps-fréquence à l'aide d'une transformée de Fourier à court terme (TFCT) pour obtenir les caractéristiques spectrales des sources au cours du temps. Les cartographies obtenues par formation de voies représentent alors un nombre N_s de sources, soit $N_x \times N_z$ selon les axes \vec{x} et \vec{z} , pour N_f fréquences. La représentation dans un espace temps-fréquence (ou espace-fréquence) contraint à un compromis entre les résolutions spatiale selon \vec{x} , Δ_x et fréquentielle, Δ_f , au mieux $\Delta_f = v/\Delta_x$. On propose alors de définir Δ_x comme égale à l'ouverture du lobe principal de l'antenne à -3dB [11].

Pour une source à bande étroite centrée sur f , la TF de l'équation (5) permet de remplacer la convolution dans le domaine temporel par un produit dans le domaine fréquentiel, s'écrivant suivant un formalisme matriciel

$$\hat{\mathbf{s}}(f) = \mathbf{W}(f)^T \mathbf{p}(f) \quad (9)$$

où $\hat{\mathbf{s}}$ est le vecteur $[N_s \times 1]$ contenant l'estimation de l'amplitude des sources, \mathbf{p} le vecteur $[M \times 1]$ des mesures dans le domaine fréquentiel et \mathbf{W} la matrice $[M \times N_s]$ des vecteurs de pointage telle que

$$\mathbf{W}(f) = [\mathbf{w}_1(f) \cdots \mathbf{w}_n(f) \cdots \mathbf{w}_{N_s}(f)], \quad (10)$$

avec

$$\mathbf{w}_n(f) = \frac{1}{\Xi} \begin{bmatrix} \frac{\exp(2\pi f j r_{n1}/c)}{4\pi r_{n1}} \\ \vdots \\ \frac{\exp(2\pi f j r_{nm}/c)}{4\pi r_{nm}} \\ \vdots \\ \frac{\exp(2\pi f j r_{nM}/c)}{4\pi r_{nM}} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

En utilisant l'expression matricielle de la transformée de Fourier de l'équation (1)

$$\mathbf{p}(f) = \mathbf{H}(f)\mathbf{s}(f), \quad (12)$$

avec

$$\mathbf{H}(f) = [\mathbf{h}_1(f) \cdots \mathbf{h}_i(f) \cdots \mathbf{h}_{N_s}(f)], \quad (13)$$

où

$$\mathbf{h}_i(f) = \begin{bmatrix} \frac{\exp(-2\pi f j r_{i1}/c)}{4\pi r_{i1}} \\ \vdots \\ \frac{\exp(-2\pi f j r_{im}/c)}{4\pi r_{im}} \\ \vdots \\ \frac{\exp(-2\pi f j r_{iM}/c)}{4\pi r_{iM}} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

l'équation (9) peut s'écrire

$$\hat{\mathbf{s}}(f) = \mathbf{W}(f)^T \mathbf{H}(f)\mathbf{s}(f), \quad (15)$$

où \mathbf{s} est le vecteur $[N_s \times 1]$ des amplitudes des sources. En considérant maintenant les énergies des sources supposées statistiquement indépendantes, il vient

$$\hat{\mathbf{S}}(f) = \tilde{\mathbf{D}}(f)\mathbf{S}(f) \quad (16)$$

avec $\hat{\mathbf{S}}$ le vecteur $[N_s \times 1]$ des énergies estimées des sources par la formation de voies, \mathbf{S} le vecteur $[N_s \times 1]$ des énergies des vraies sources et $\tilde{\mathbf{D}}$ la matrice $[N_s \times N_s]$ de convolution de terme général

$$\tilde{D}_{ni} = |TFCT\{\mathbf{w}_n^T(t) * \mathbf{h}_i(t)\}(\tau, f)|^2, \quad (17)$$

\mathbf{w}_n et \mathbf{h}_i sont les expressions temporelles définies respectivement dans les équation (8) et (2). \tilde{D}_{ni} exprime la contribution de la $i^{\text{ième}}$ source à l'estimation en n . La particularité du mouvement des sources est que les sources secondaires, lorsqu'elles ne sont pas en face de l'antenne, contribuent aux fréquences modulées par l'effet Doppler. La figure 4 présente la réponse de l'antenne pour une source harmonique à 700 Hz passant à 320 km/h et l'estimation de la formation de voies. La représentation espace-fréquence de la sortie de la formation de voies est représentée en figure 2b. Les sources fantômes sont créées quand la source passe devant les lobes secondaires et à la fréquence modulée.

3 Déconvolution au passage

3.1 Algorithme de déconvolution

La déconvolution consiste à inverser la matrice $\tilde{\mathbf{D}}$ pour remonter au vecteur \mathbf{S} . Cependant la matrice $\tilde{\mathbf{D}}$ est de dimension trop importante pour être inversée directement. DAMAS a été proposé pour déconvoluer l'estimation fournie par la formation de voies et obtenir des résultats non biaisés. Il repose sur l'algorithme

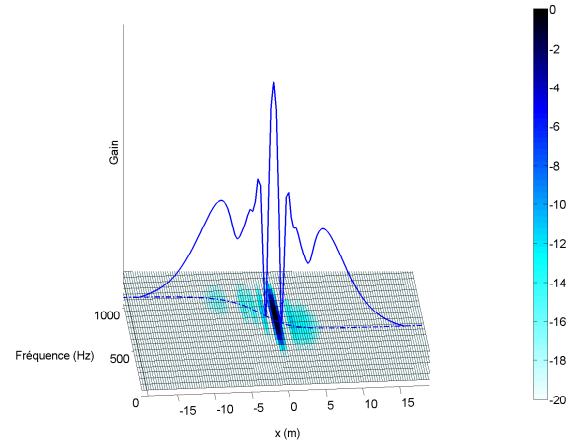


FIGURE 4 – Réponse de l'antenne au passage d'une source.

d'inversion de Gauss-Seidel, connu pour sa robustesse et sa convergence rapide [14]. Terme à terme, la formation de voies en n s'écrit

$$\hat{S}_n = \sum_{i=1}^{N_s} \tilde{D}_{ni} S_i. \quad (18)$$

Les valeurs sources sont alors obtenues en corrigeant les contributions des autres sources de l'estimation de la formation de voies

$$S_n = \frac{1}{\tilde{D}_{nn}} \left(\hat{S}_n - \sum_{i=1}^{n-1} \tilde{D}_{ni} S_i - \sum_{i=n+1}^{N_s} \tilde{D}_{ni} S_i \right). \quad (19)$$

Cependant, les valeurs de S_i sont inconnues. En posant une valeur initiale s^0 , la solution est calculée itérativement

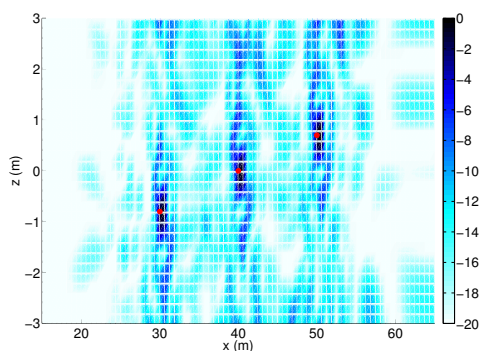
$$S_n^k = \frac{1}{\tilde{D}_{nn}} \left(\hat{S}_n - \sum_{i=1}^{n-1} \tilde{D}_{ni} S_i^k - \sum_{i=n+1}^{N_s} \tilde{D}_{ni} S_i^{k-1} \right); \quad (20)$$

Les contributions sont corrigées à l'itération k si cette source a déjà été corrigée ou sinon à l'itération $k-1$. L'indice n balaye alors l'ensemble des sources et k est incrémenté. Cet algorithme nécessite que $\tilde{\mathbf{D}}$ soit définie positive ou à diagonale dominante. Cette condition n'est pas toujours vérifiée. Pour forcer la convergence, les données énergétiques sont considérées, ainsi si une valeur est calculée négative, elle est mise à zéro pour respecter la physique du problème.

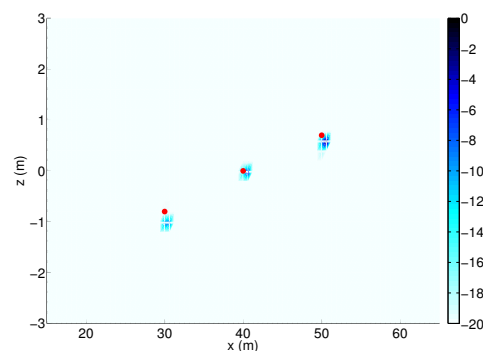
3.2 Prise en compte du mouvement des sources

La particularité du problème est que les sources sont en mouvement, ce qui implique que la formation de voies ne donne l'estimation des N_z sources \mathbf{s}_τ qu'en face de l'antenne à l'instant τ . Les autres sources sont alors modulées selon la loi Doppler. La déconvolution doit être réalisée en tenant compte de ces deux différences par rapport aux sources immobiles.

Au delà d'une certaine limite, l'amplitude de ces sources est trop atténuée, Eq. (3), leur contribution est alors



(a) Formation de voies



(b) Déconvolution

FIGURE 5 – Comparaison entre les cartographies obtenues par (a) formation de voies et par (b) déconvolution pour trois sources harmoniques à 600 Hz se déplaçant à 300 km/h.

négligée.

L'utilisation de la TFCT, pour obtenir à la fois les positions et les spectres des sources, discrétise alors l'espace selon \vec{x} et les fréquences. Pour une fréquence d'intérêt f_n , la contribution de la source située en x_i est à la fréquence

$$f_i = \frac{f_n}{1 - Mach \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + R^2}}}, \quad (21)$$

$x_i = 0$ correspond à l'abscisse du centre de l'antenne. f_i est approchée à la fréquence la plus proche du plan temps-fréquence obtenu par TFCT.

Ainsi, les contributions des sources situées sur le point x_i sont retirées dans le plan fréquentiel f_i

$$S_n^k[f_n] = \frac{1}{\tilde{D}_{nn}[f_n]} \left(\hat{S}_\tau - \sum_{i=1}^{n-1} \tilde{D}_{ni}[f_i] S_i^{k-1} - \sum_{i=n+1}^{N_s} \tilde{D}_{ni}[f_i] S_i^k \right). \quad (22)$$

L'indice n correspond aux sources à l'abscisse 0 m à l'instant τ , c'est-à-dire devant l'antenne, dont la fréquence n'est pas modulée. Pour les autres sources, les contributions doivent être prises en compte à la fréquence f_i . Quand les sources en face sont corrigées, τ est incrémenté, les sources sont corrigées à une autre fréquence et enfin l'indice de Gauss-Seidel k est augmenté. L'algorithme est rappelé en figure 6.

L'algorithme est appliqué à l'exemple de la source harmonique à 800 Hz et se déplaçant à 320 km/h, figures 2a et 2b. Le plan espace-fréquence déconvolué est présenté sur la figure 2c, l'effet Doppler est supprimé. La cartographie du passage de 3 sources harmoniques à 800 Hz se déplaçant à 320 km/h obtenue par formation de voies est présentée sur la figure 5a. Les sources sont localisées sur les points rouges. La déconvolution nettoie les sources fantômes créées par les lobes secondaires, figure 5b.

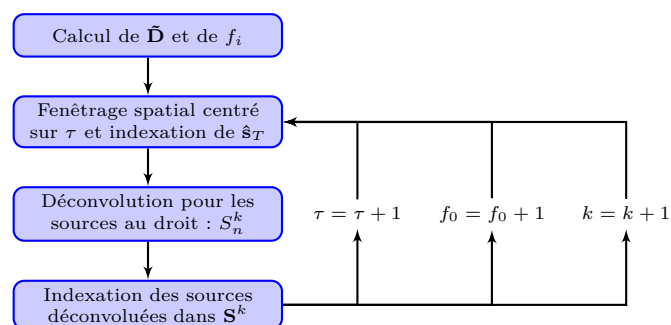


FIGURE 6 – Déroulement de l'algorithme de déconvolution pour une source au passage.

4 Application au passage d'un TGV

La méthode est appliquée sur un passage de TGV avec une antenne de 40 microphones dont les positions ont été optimisées [11]. Les résultats sont comparés avec ceux obtenus par les méthodes de formation de voies et de dédopplerisation pour une motrice à la fréquence de 1289 Hz et pour le troisième bogie à la fréquence de 2052 Hz. Pour la méthode de dédopplerisation, les pas d'analyse Δ_x et Δ_z sont identiques : de 0,5 m pour les cartographies de motrice et 0,1 m pour la cartographie du bogie. Pour la formation de voies et la déconvolution au passage, Δ_x vaut 0,6 m à 1289 Hz et 0,3 m à 2052 Hz et $\Delta_z = 0,5$ m.

À la fréquence 1289 Hz, la dédopplerisation identifie, sur la cartographie de la figure 7a, les persiennes comme la principale source de bruit. La première roue est encore une source importante. Sur les Figures 7b et 7c le pas spatial est de 0,6 m. La plupart des sources créées par la formation de voies sont supprimées par la déconvolution au passage. Les principales sources de bruit sont localisées au niveau des roues. Il semblerait que l'influence des persiennes soit sous-estimée par la méthode de la déconvolution au passage.

Les cartographies obtenues pour le troisième bogie à la fréquence 2059 Hz par les méthodes de dédopplerisation, formation de voies et déconvolution sont présentées respectivement sur les figures 8a, 8b et 8c. La

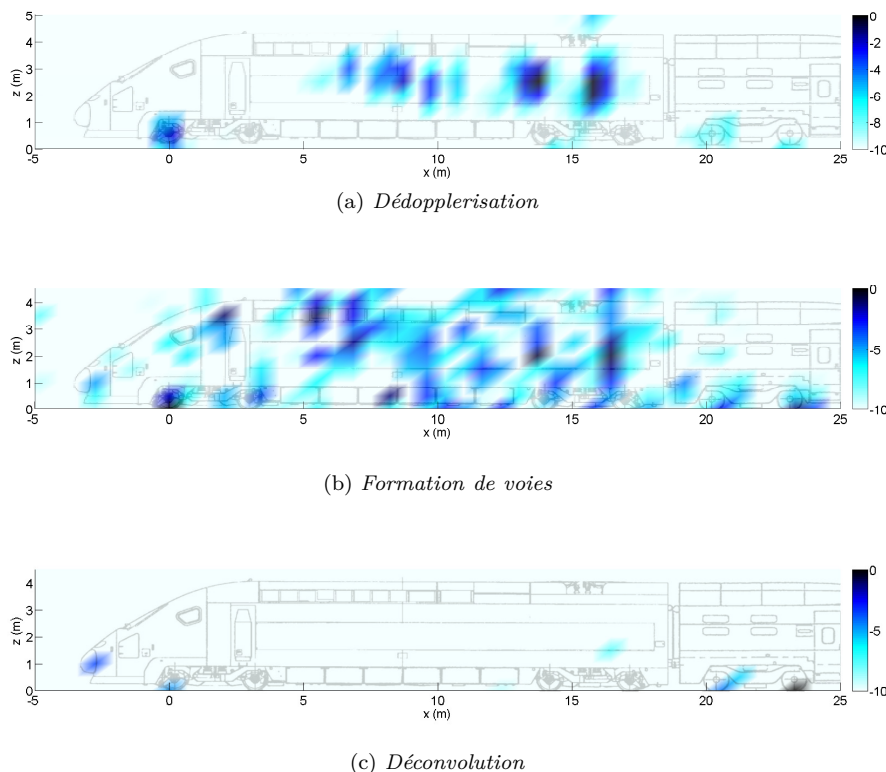


FIGURE 7 – Comparaison de cartographies de motrice de TGV circulant à 320 km/h obtenues par (a) dédopplerisation, (b) formation de voies et (c) déconvolution au passage pour la fréquence de 1289 Hz. $\Delta_z = 0,5$ m, $\Delta_x = 0,5$ m pour la cartographie obtenue par dédopplerisation et $\Delta_x = 0,6$ m pour les cartographies obtenues par formation de voies et déconvolution au passage.

déconvolution permet d'améliorer la résolution des cartographies par rapport à la formation de voies. Les trois méthodes identifient la première roue du bogie comme la principale source.

5 Conclusion

La déconvolution permet d'estimer de manière quantitative l'énergie rayonnée par les sources acoustiques. Cet article s'intéresse à l'application de l'algorithme DAMAS dans le cas de sources en mouvement rapide. La spécificité repose sur la représentation espace-fréquence du signal pour nettoyer les contributions selon les fréquences modulées par l'effet Doppler.

L'application sur des TGV au passage montre un avantage de la méthode par rapport à la formation de voies classique. Cependant, la méthode semble limitée pour les sources étendues. La prise en compte de la cohérence pourrait améliorer les résultats.

Références

- [1] D. JOHNSON et D. DUDGEON, *Array signal processing : concepts and techniques*. Prentice-Hall signal processing, P T R Prentice Hall, 1993.
- [2] F. LE COURTOIS, F. POISSON, J.-H. THOMAS et J.-C. PASCAL, « Sound sources characterization on a high speed train from microphone array measurements », *In proceedings of Inter-Noise 2011*, Septembre 2011. Osaka (Japan).
- [3] F. LE COURTOIS, J.-C. PASCAL, F. POISSON et J.-H. THOMAS, « Optimisation par algorithme génétique de la géométrie d'antenne pour la localisation de sources », *Dans les actes du 10^{ième} Congrès Français d'Acoustique*, Avril 2010. Lyon (France).
- [4] J. A. HÖGBOM, « Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines », *Astronomy and astrophysics supplement*, vol. 15, p. 417–426, 1974.
- [5] T. F. BROOKS et W. M. HUMPHREYS, « A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (damas) determined from phased microphone arrays », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 294, p. 856–879, Juillet 2006.
- [6] R. P. DOUGHERTY, « Extensions of damas and benefits and limitations of deconvolution in beamforming », *American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper*, vol. 2005-2961, 2005.

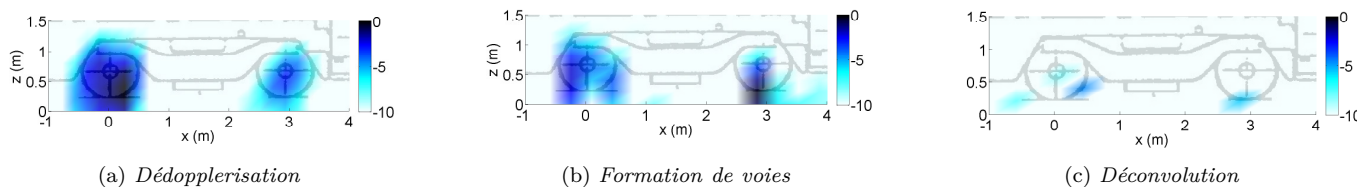


FIGURE 8 – Comparaison de cartographies du troisième bogie d'un TGV circulant à 320 km/h obtenues par (a) dédopplerisation, (b) formation de voies et (c) déconvolution au passage pour la fréquence de 2052 Hz. $\Delta_z = 0,5$ m, $\Delta_x = 0,5$ m pour la cartographie obtenue par dédopplerisation et $\Delta_x = 0,6$ m pour les cartographies obtenues par formation de voies et déconvolution au passage.

- [7] J.-C. PASCAL et J.-F. LI, « Resolution improvement of data-independant beamformers », *In proceedings of Inter-Noise 2007*, Inter-noise, Août 2007. Istanbul.
- [8] T. SUZUKI, « L1 generalized inverse beamforming algorithm resolving coherent/incoherent, distributed and multipole sources », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330, p. 5835–5851, Novembre 2011.
- [9] F. POISSON, *Localisation et caractérisation de sources acoustiques en mouvement rapide*. Thèse de doctorat, Université du Maine, 1995.
- [10] B. BARSIKOW, « On removing the doppler frequency shift from array measurements of railway noise », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 120 (1), p. 190–196, 1988.
- [11] F. LE COURTOIS, *Caractérisation des sources acoustiques sur le matériel ferroviaire par méthode d'antennerie*. Thèse de doctorat, Université du Maine, Septembre, 2012.
- [12] V. FLEURY et J. BULTÉ, « Extension of deconvolution algorithms for the mapping of moving acoustic sources », *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 129, p. 1417–1428, March 2011.
- [13] S. RIENSTRA et A. HIRSCHBERG, *An introduction to acoustics*. Eindhoven Institute of Technology, 20 août 2008. p.281.
- [14] G. H. GOLUB et C. F. V. LOAN, *Matrix computations*. Baltimore : Johns Hopkins University Press, 3rd éd., 1996. p.510.