

LOCALISATION ET QUANTIFICATION EN CHAMP PROCHE DE SOURCES MOBILES A GRANDE VITESSE

Marie-Agnès PALLAS

Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité
Département Modélisation Mécanique et Acoustique
109, avenue Salvador Allende - Case 24 - 69675 Bron Cédex - France

RÉSUMÉ

Une formation de voie 2 D classique sans pondération, optimale pour les ondes planes, est analysée dans les conditions pratiques d'une expérimentation ferroviaire réalisée en champ proche au passage de rames à grande vitesse. Les perturbations de la réponse de l'antenne sont analysées, tant la sélectivité spatiale, les questions de repli spatial, que la qualité de la quantification des sources, ceci dans l'hypothèse de sources ponctuelles.

ABSTRACT

A classical 2 D beamforming without any weighting, which is optimal for plane waves, is analysed in the actual conditions of a nearfield railway experiment at the pass-by of high speed trains. The disturbance on the array response is studied under the assumption of point sources : spatial selectivity, spatial aliasing, as well as source level quantization.

1. INTRODUCTION

Peu de techniques sont spécifiques à la détection et à la localisation de sources mobiles à grande vitesse. Un certain nombre de procédures, généralement en champ lointain, tentent de se ramener au cas de sources quasi-immobiles en utilisant des temps d'observation très courts, pendant lesquels le contexte a peu évolué : la qualité des résultats dépend du choix du traitement et de sa robustesse aux variations des paramètres du modèle (voir par exemple [1] pour la formation de voie et MUSIC, [2] pour l'imagerie interférométrique).

Pour des mesures réalisées en champ proche, où les variations sont très rapides (en particulier l'effet Doppler), il est possible par des techniques dites de dédopplérisation, de corriger les évolutions de la fréquence instantanée : ceci permet d'augmenter les intervalles d'observation, et par suite la précision des estimations, tout en mettant en oeuvre des traitements classiques du type formation de voie [3] [4]. Dans [5], la technique envisagée est différente : elle repose sur un modèle du signal émis par la source et réalise un filtrage adapté du signal reçu au modèle dopplérisé, sans traitement d'antenne spécifique. La difficulté est liée dans ce cas à la connaissance préalable du modèle du bruiteur.

Le problème traité dans cet article se rattache à la première catégorie que nous avons citée, où des techniques adaptées à des conditions stationnaires (formation de voies) sont mises en oeuvre dans un contexte fortement non stationnaire. Deux types de perturbations surviennent alors. D'une part, la réponse de l'antenne au passage de la source se

modifie : la résolution spatiale est différente lorsque la source s'approche ou quand elle s'éloigne. D'autre part la quantification des sources de bruit peut être soumise à un biais qui dépend à la fois de la vitesse des sources et de la fréquence d'analyse. Ces points sont évoqués par le biais de l'étude acoustique de véhicules ferroviaires circulant à grande vitesse, les mesures étant réalisées au passage des rames et en champ proche. Il s'agit ici d'une analyse de la méthode, envisagée dans le cadre de sources supposées ponctuelles.

2. CONTEXTE EXPERIMENTAL

Une antenne plane 8 x 8 capteurs (Métravib) à maillage carré de pas $d = 6$ cm est placée en bordure de voie, à 2 mètres de la face latérale du train. Les trains circulent à des vitesses pouvant atteindre 350 km/h. Les sorties des microphones sont additionnées sans aucune pondération ni déphasage, réalisant ainsi une formation de voies pointant dans la direction normale au plan de l'antenne. Le passage du train sur sa voie devant l'antenne permet le défilement horizontal des sources, qui peuvent être détectées et quantifiées lors de leur présence dans le lobe de directivité. L'antenne est placée à différentes hauteurs lors des passages successifs du train, pour permettre une localisation verticale des sources. En sortie de la formation de voies, le signal est filtré par bande d'octave, et le niveau rms est calculé pour des fenêtres d'observation glissantes de durée $T = 8$ ms (le déplacement correspondant du train est de 78 cm à 350 km/h).



Ce processus a été mis en oeuvre dans le cadre de la coopération franco-allemande (DEUFRAKO) sur le bruit des trains à grande vitesse.

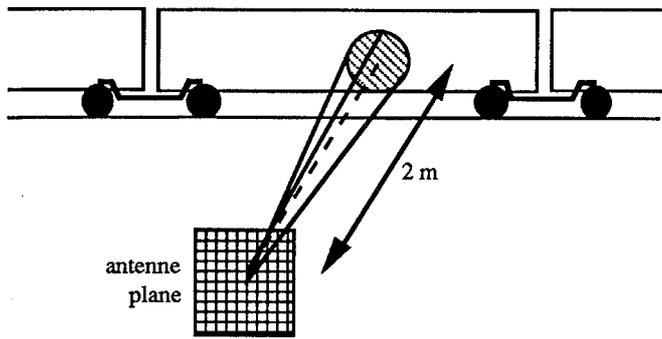


Fig. 1: Contexte expérimental

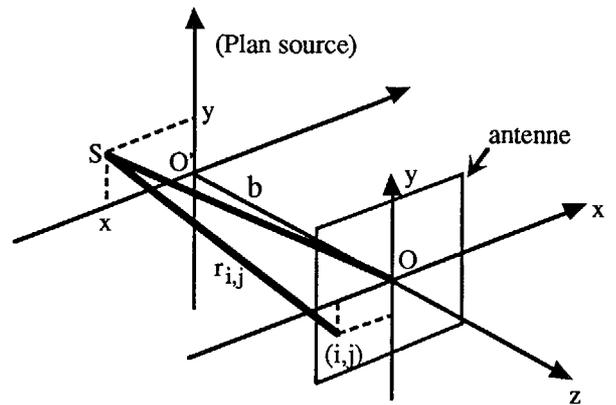


Fig. 2: Représentation géométrique

3. REPONSE SPATIALE DE L'ANTENNE [6]

3.1 Préliminaire : source immobile

Les développements qui suivent supposent que les sources sont ponctuelles omnidirectionnelles (monopôles). Comme les distances sources-antenne sont faibles, les fronts d'ondes sur l'antenne sont sphériques. Or la formation de voie sans pondération (1) est optimale pour des ondes planes se propageant parallèlement à la normale à l'antenne, non pour des ondes sphériques.

$$s(t) = \frac{1}{p^2} \left| \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p s_{ij}(t) \right| \quad (1)$$

$s_{ij}(t)$: signal en sortie du capteur (i, j).

Etant donné que l'on ne cherche pas à localiser les sources en fonction de leur incidence sur l'antenne, mais plutôt par leur position dans le plan-source (paroi latérale du train), nous caractérisons la sélectivité spatiale de l'antenne non pas par la directivité mais par la réponse de l'antenne $\mathcal{R}(x,y)$, qui exprime le signal délivré en sortie de l'antenne en fonction de la position (x,y) de la source S dans le plan source (figure 2).

$\mathcal{R}(x,y)$ dépend à la fois de la directivité de l'antenne et de l'atténuation en fonction de la distance source-antenne. Pour une source monochromatique de fréquence f :

$$\mathcal{R}(x,y) = \frac{1}{p^2} \left| \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \frac{e^{-2j\pi f \frac{r_{ij}}{c}}}{4\pi r_{ij}} \right| \quad (2)$$

p : nombre de capteurs par ligne (resp. par colonne)

r_{ij} : distance de la source au capteur (x_i, y_j)

$$r_{ij} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_j)^2 + b^2}$$

b : distance plan antenne/plan source

Tout comme dans le cas des ondes planes, la réponse $\mathcal{R}(x,y)$ présente de chaque côté du lobe principal une succession de lobes secondaires d'amplitude décroissante. Les zéros de la fonction ne sont pas équidistants sur une échelle en (x, y). Pour des fréquences suffisamment élevées peuvent apparaître des lobes de repli (figure 3) : ces lobes sont toutefois très atténués s'ils surviennent pour des grandes incidences donc des positions (x, y) de la source éloignées du centre O' du plan-source, et nous pouvons définir la condition suivante sur la fréquence, autorisant les lobes secondaires jusqu'à la limite du repli du lobe principal :

$$f \leq \frac{p-1}{p} \frac{c}{d} \quad (3)$$

(d : distance intercepteurs)

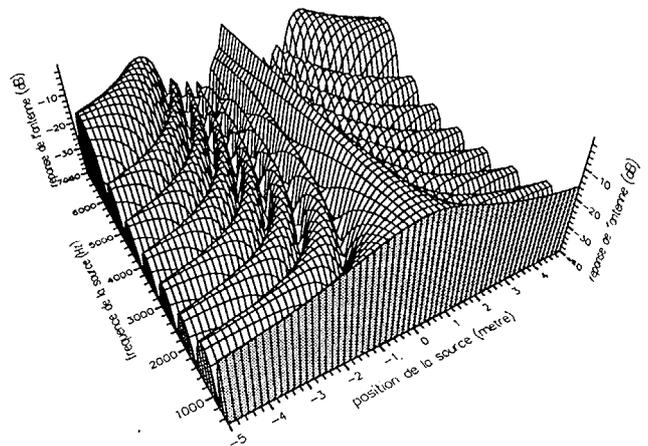


Fig. 3: Réponse de l'antenne en fonction de la fréquence (source ponctuelle sur l'axe O'x)

3.2 Source mobile

Si (x₀, y₀, z₀) sont les coordonnées du point d'observation, et si la source monopôle se déplace sur l'axe O'x à la vitesse constante v telle que x = vt, la pression reçue au point d'observation est [7] :

$$p(t) = \frac{1}{4\pi R} \frac{q' \left(t - \frac{R}{c} \right)}{(1 - m \cos \theta)^2} \quad (4)$$

où:

$$R = \frac{m(x_0 - vt) + R_1}{1 - m^2}$$

$$R_1 = \sqrt{(x_0 - vt)^2 + (1 - m^2)(y_0^2 + z_0^2)}$$

$$\cos \theta = \left(1 - \frac{R_1}{R}\right) / m$$

$$m = \frac{v}{c}$$

$q(t)$: débit massique de la source, $q'(t) = \frac{dq(t)}{dt}$

La pression à l'avant de la source ($\theta = 0$) est plus grande qu'à l'arrière dans un rapport $(1 + m)^2 / (1 - m)^2$.

Pour une source monochromatique de fréquence f , on retrouve l'effet Doppler sur la fréquence instantanée du signal reçu $\nu(t) = \frac{f}{1 - m \cos \theta}$. Pour une source à 4 000 Hz se

déplaçant à 350 km/h dans les conditions définies au §2, la fréquence instantanée varie de 5 600 Hz quand la source approche de $-\infty$ à 3 120 Hz lorsqu'elle s'éloigne. Si la distance (observateur - droite de déplacement de la source) est faible, la fréquence instantanée varie très rapidement au voisinage de l'observateur et les valeurs asymptotiques sont vite atteintes (dès $x \sim \pm 5$ m dans les conditions du § 2).

Quant à l'antenne, elle somme à l'instant t les signaux reçus sur chacun des capteurs. En raison des retards de propagation, ces signaux reçus n'ont pas été émis pour une position unique de la source, et correspondent chacun à des instants d'émission et des dopplers distincts.

Ceci influence bien évidemment la réponse de l'antenne :

$$R(x, y) = \frac{1}{p^2} \left| \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \frac{e^{-2j\pi f \frac{r_{ij}}{c}}}{(1 - m \cos \theta_{ij})^2} \frac{1}{4\pi r_{ij}} \right| \quad (5)$$

où r_{ij} et θ_{ij} sont définis pour chaque capteur dans (4) en supposant que la source se déplace à vitesse constante sur un axe horizontal.

D'une façon générale, lorsque la source s'approche de l'antenne, il y a élévation des fréquences et des amplitudes : en comparaison du cas de sources immobiles, il y a compression spatiale de la réponse (les lobes sont plus étroits) mais les lobes secondaires ont une amplitude plus importante. En revanche lorsque la source s'éloigne il y a diminution des fréquences et des amplitudes : la réponse de l'antenne est dilatée (moins bonne sélectivité spatiale) mais les niveaux des lobes secondaires sont atténués. Au voisinage de la normale à l'antenne ($-1m \leq x \leq 1m$), le coefficient Doppler est voisin de 1, et la réponse est peu différente du cas $v=0$.

Le point critique concerne l'apparition du repli spatial. Le décalage vers les hautes fréquences à l'approche de la source favorise l'émergence des lobes de repli pour des

fréquences de source pourtant au-dessous du seuil limite classique d'un échantillonnage spatial correct (3). En particulier, pour une source de fréquence 4 000 Hz le repli du lobe principal apparaît pour toute vitesse supérieure à 237 km/h. Cependant, si les lobes de repli existent seulement pour les grandes incidences (donc pour des positions éloignées de la source dans le plan-source), ces lobes seront fortement atténués en raison des grandes distances de propagation source-antenne. En résumé, la fréquence maximale dans le cas d'une source mobile est inférieure à celle du cas de sources fixes et dépend de la vitesse de la source :

$$f_{\max} = (c - v) \frac{p - 1}{p} \frac{1}{d} \quad (6)$$

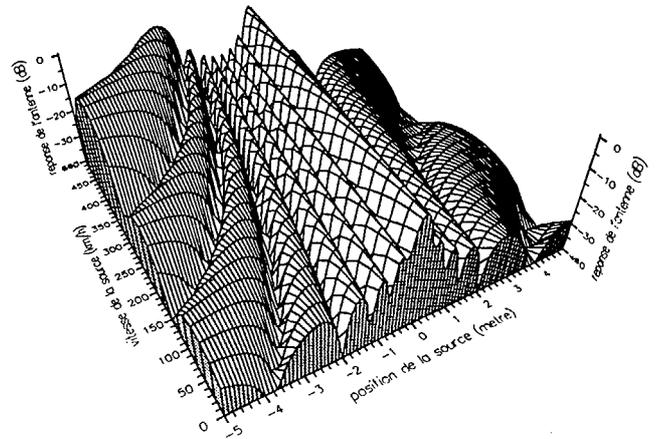


Fig. 4: Réponse de l'antenne en fonction de la vitesse de la source. (source ponctuelle sur l'axe O'x)

Il nous faut encore considérer l'effet du temps d'intégration T dans le calcul de la pression rms : $p_{rms}(t) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} p^2(\tau - t) d\tau$. La durée d'intégration T

introduit un phénomène de flou (ou bougé) qui dégrade la sélectivité de la réponse de l'antenne, essentiellement aux hautes fréquences où le lobe principal est étroit :

Exemple	Fréquence	Largeur à -3 dB $v = 0$	Largeur à -3 dB $v = 350$ km/h
	(Valeurs mesurées)	1 000 Hz	1.3 m
	2 000 Hz	0.64 m	0.87 m
	4 000 Hz	0.32 m	0.81 m

4. QUANTIFICATION DES SOURCES [6]

De façon à se ramener au cas connu d'une mesure par microphone, nous choisissons comme référence $p_0 = 1/4\pi b$, pression reçue par un microphone placé au centre de l'antenne lorsque la source se trouve dans le plan source sur



la normale à l'antenne (point O'), c'est-à-dire dans la direction de visée. Il serait souhaitable que le niveau mesuré par l'antenne lorsque la source (isolée) se trouve en O' soit le même que pour le microphone. Or les effets combinés de l'antenne non optimale, du mouvement rapide de la source et du temps d'intégration T font qu'à son passage dans le lobe de directivité, le niveau de la source est estimé à une valeur différente de p_0 , et qui de plus varie en fonction du contexte vitesse-fréquence de la source. A 350 km/h, l'écart atteint 4.7 dB entre le niveau que mesure l'antenne pour une source à 500 Hz et celui d'une source identique à 4 000 Hz (figure 5) : il y a un biais non systématique qu'il convient de corriger au cas par cas lors de la quantification de chaque source.

Ces remarques valent pour des sources de petites dimensions. Il est évident que pour des sources étendues les niveaux mesurés tiennent compte en plus de la directivité de l'antenne, ce qui induit un comportement différent, qui sera traité ultérieurement.

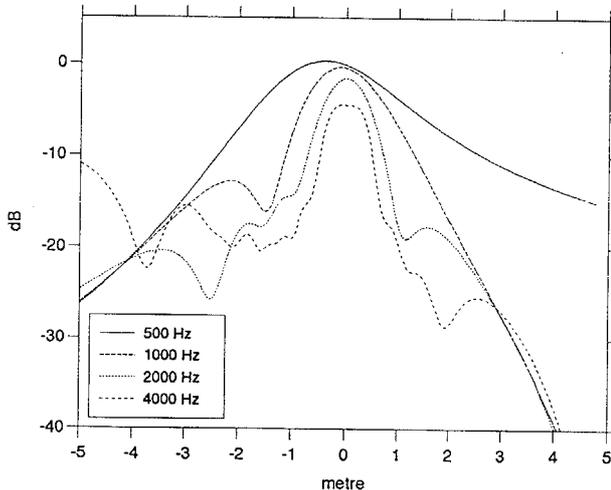


Fig. 5: Réponse de l'antenne pour une source ponctuelle à 350 km/h sur l'axe O'x

5. CONCLUSION

En présence de sources supposées ponctuelles, la réponse d'une antenne réalisant une formation de voie 2 D

classique chargée de détecter et quantifier les sources en champ proche à leur passage dans le lobe de directivité voit ses performances fortement perturbées : dissymétrie de la réponse spatiale, condition plus stricte sur le repli spatial, biais pour l'estimation du niveau des sources fonction de la fréquence et de la vitesse des sources. A titre d'illustration, la figure 5 présente la réponse simulée dans les conditions du § 2 au passage de la motrice TGV à 350 km/h où une seule source ponctuelle de niveau 90 dB et de fréquence 4 000 Hz a été placée sur le premier essieu du deuxième bogie : on voit l'importance que prend le lobe de repli avant la source qui est elle-même estimée à 85.5 dB.

REFERENCES

- [1] - O. ZUGMEYER, J.P. LE CADRE, "Méthodes d'intégration temporelle en traitement d'antenne", IRISA, rapport interne n° 566, décembre 1990
- [2] - G. GOBET, P. PITTET, "Imagerie acoustique spatiofréquentielle de véhicules ferroviaires", rapport ICPI, 1990
- [3] - M. ERNOULT, "Analyse spectrale des processus aléatoires non stationnaires - Applications aux bruits de type "survol d'avion", rapport ONERA, 1979
- [4] - B. BARSIKOW, W. F. KING III, "On removing the Doppler frequency shift from array measurements of railway noise", Journal of Sound and Vibration, 120 (1), pp. 190-196, 1988
- [5] - F. POISSON, "Localisation des sources de bruit sur un TGV en mouvement par une méthode d'antennerie acoustique", Rapport DEA IRISA, juillet 1992
- [6] - M.A. PALLAS, "Deufrako : Caractéristiques de l'antenne plane microphonique utilisée dans les mesures françaises", rapport MMA 9302, INRETS, mars 1993
- [7] - P.M. MORSE, K.U. INGARD, "Theoretical acoustics", New-York : Mac Graw Hill Book co., 1968

Niveau en dB

ABOVE	90.00
88.00 -	90.00
86.00 -	88.00
84.00 -	86.00
82.00 -	84.00
80.00 -	82.00
78.00 -	80.00
76.00 -	78.00
74.00 -	76.00
72.00 -	74.00
70.00 -	72.00
BELOW	70.00

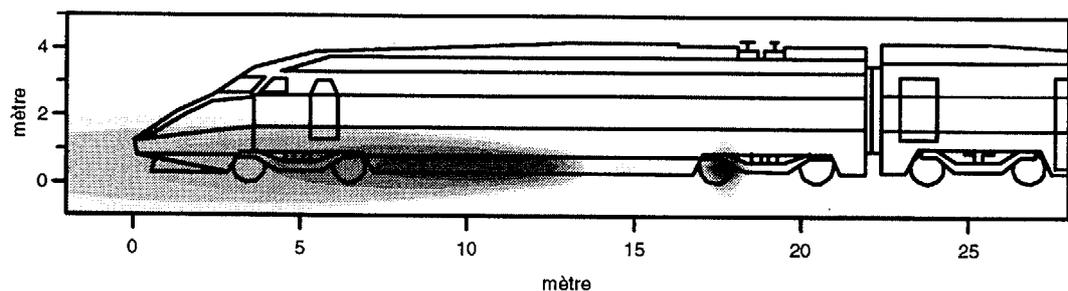


Fig.6: Simulation de la réponse de l'antenne pour une source ponctuelle omnidirectionnelle sur le 3ème essieu de la motrice (vitesse 350 km/h)