

Localisation de sources de bruit : sources mobiles sur TGV et sources en écoulement

Cyril Mellet

SNCF
Agence d'essai ferroviaire
21, avenue du Président Allende
94407 Vitry sur Seine CEDEX
Tél. : 01 47 18 82 34
Fax : 01 47 18 82 30
e-mail : cyril.mellet@sncf.fr

Olivier Coste

Signal Développement
12, boulevard Chasseigne
86000 Poitiers
Tél. : 05 49 46 24 01
Fax : 05 49 41 53 09
e-mail : info@signal-developpement.com

Franck Poisson

SNCF
Direction de l'innovation et de la recherche
45, rue de Londres
75379 Paris CEDEX 8
Tél. : 01 53 42 92 39
Fax : 01 53 42 97 84
e-mail : franck.poisson@sncf.fr

Résumé

La démarche de réduction du bruit des transports se décompose en trois étapes :

- l'identification des principales sources d'émission,
- la caractérisation de ces sources,
- la recherche de solution permettant la réduction de bruit.

L'application de cette démarche au bruit des transports routier et ferroviaire représente un enjeu majeur pour leur insertion dans les environnements urbains et périurbains. En effet, si certaines sources comme la motorisation, les auxiliaires de ces matériels roulants peuvent être caractérisées à l'arrêt ou au banc, des sources comme le bruit de roulement ou le bruit aérodynamique nécessitent des mesures au passage ou en soufflerie. L'imagerie acoustique est un outil permettant de caractériser ces sources de bruit dans des situations d'exploitation.

Ce document présente deux méthodes d'application de l'antennerie acoustique et d'exploitation des résultats. La première traite de la mise en œuvre d'antennerie acoustique au cas d'un TGV Duplex circulant jusqu'à 350 Km/h; la seconde, d'une mesure en soufflerie sur une maquette illustrant les résultats obtenus avec un traitement d'antenne classique « Conventional Beamforming » et l'apport d'un algorithme de nettoyage de type CLEAN.

Abstract

The reduction of transportation noise is based on three steps. The first one concerns the identification of the main noise sources. Then, acoustic characteristics of the main sources are extracted and, at the end, noise mitigation measures are studied to be applied.

This approach is needed to guarantee the compatibility of the road and railway transportation with the environmental constraints, mainly in urban and suburban areas. Most of the noise sources of cars and trains (engine, cooling, air conditioning, electric converter, ...) can be characterised in stand by measurement. Nevertheless, pass-by measurement are needed to characterize rolling and aerodynamic noise. Antenna measurement allow to characterise these noise sources in operating conditions.

The article presents two different methods of array processing. The first one is dedicated to the characterisation of the noise sources of a TGV during its pass-by (350kph), the second one concerns the acoustic characterisation of the corresponding scale model in a wind tunnel. The advantage of the CLEAN algorithm is discussed compared to the conventional beamforming.

This work is carried out in the context of the PREDIT project called MIMOSA and dedicated to the reduction of the aerodynamic noise of trains and cars. The authors thank the project partners for their contribution.

Caractérisation de sources mobiles au passage

Formation de voie et dédopplérisation

Le bruit généré par le contact roue-rail et les sources d'origine aérodynamique ne peut être caractérisé qu'en situation d'exploitation. Ces sources sont alors en mouvement et sont en conséquence soumises à l'effet Doppler. Cet effet Doppler conduit à une modulation

d'amplitude et de fréquences des signaux émis par chaque source. Pour obtenir des cartographies représentatives des sources, il est nécessaire de corriger ces modulations.

Cette « dédopplérisation » [1] consiste à rééchantillonner le signal reçu en tenant compte à chaque instant de la position de la source. Si t_e désigne l'instant d'émission à la source S et t_r l'instant de réception sur le microphone M_r , alors :

$$t_r = t_e + \frac{\|SM_i(t_e)\|}{c} \quad (1)$$

Avec $\|SM_i(t_e)\|$ la distance source/capteur i que l'on peut calculer à chaque instant d'émission t_e et c la célérité du son.

Parmi les solutions envisageables pour le traitement des mesures d'antennerie acoustique sur sources mobiles [2], l'approche temporelle de la formation de voie a démontré sa robustesse et sa fiabilité [3]. En effet, les méthodes haute résolution utilisant l'estimation de la matrice interspectrale ne sont pas adaptées; cette estimation devant être réalisée sur des durées de signal trop courte.

La correction des temps de réception (effet Doppler) se combine avec le traitement d'antenne du type formation de voie temporelle [4] permettant de localiser et de caractériser les sources pour fournir le signal de sortie de l'antenne focalisée sur la source S :

$$FV(t_r) = \frac{1}{\sum_r \frac{1}{\|SM_i(t_e)\|}} \sum_r \frac{1}{\|SM_i(t_e)\|} M_i(t_r) \quad (2)$$

Caractérisation des sources d'un TGV Duplex circulant jusqu'à 350 Km/h

L'exemple suivant présente la caractérisation des sources de bruit d'un TGV Duplex circulant jusqu'à 350 Km/h. Une antenne en « étoile » de 32 microphones située à 5 m de la voie a été mise en œuvre (figure 1).



Fig. 1 : Photographie de l'antenne en étoile

La formation de voie dans le domaine temporel est utilisée après dédopplérisation. Trois antennes en étoile d'envergures différentes ont permis de couvrir la gamme des fréquences audibles.

Les performances des machines de calcul permettent d'obtenir une image comme celle de la figure 2 en quelques minutes.

Pour être exploitable sur le plan industriel, les données issues des cartes, comme celle de la figure 2 doivent être synthétisées pour pouvoir permettre :

- une comparaison de différents matériels circulant dans différentes conditions d'exploitation,
- identifier et caractériser les sources les plus bruyantes pour, d'une part orienter les recherches sur la réduction de celles-ci et d'autre part alimenter des logiciels de prédiction et de synthèse.

Sur cet exemple de caractérisation des sources du TGV Duplex jusqu'à 350 Km/h, le développement de représentations plus synthétiques, combinant les résultats des différentes antennes sur toute la gamme de fréquence a permis de fournir un spectre en tiers d'octave des principales sources. Ces spectres, dont un exemple est fourni en figure 3, ont été obtenus en constatant l'émergence d'une source par rapport au bruit de fond de l'image et en lui affectant le niveau maximal affiché sur l'image dans sa zone d'apparition.

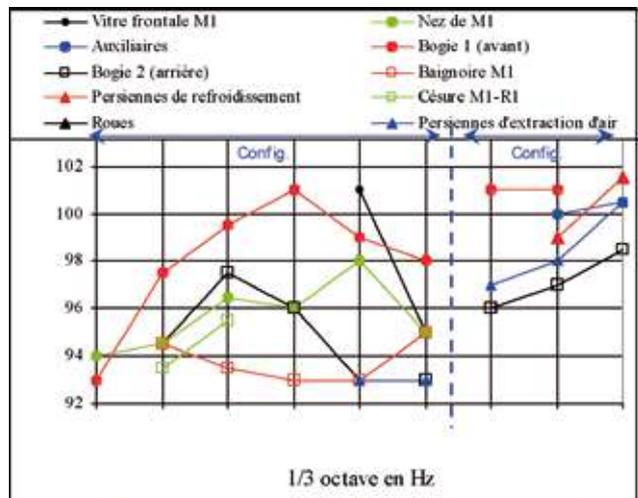


Fig. 3 : Spectres tiers d'octave (reconstruit par assemblage des résultats issus des différentes gammes de fréquence) des principales sources

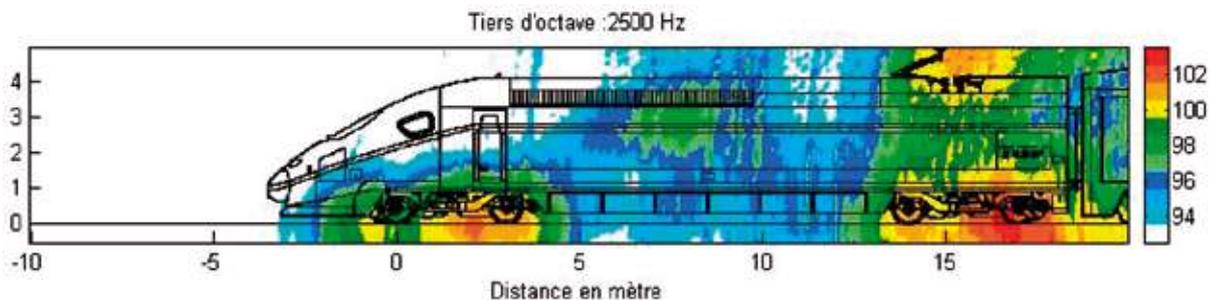


Fig. 2 : Exemple de localisation des sources de bruit pour un TGV circulant à 350 Km/h

Sur cette même application, l'analyse des cartographies obtenues par imagerie acoustique a permis de suivre l'évolution des amplitudes et des fréquences des principales sources. Ces évolutions ont été représentées sous la forme de graphes 3 D permettant de comparer les comportements de chacune des sources. La figure 4 est une illustration de cette analyse.

En toute rigueur, la mesure du niveau des sources ne peut pas être réalisée à l'aide d'un réseau de microphone. En effet, la directivité du capteur équivalent évolue avec la fréquence et l'angle de focalisation. Les résultats présentés en figures 3 et 4 doivent donc être interprétés en tenant compte de cette limitation. Néanmoins, la mise en forme des nombreuses informations issues de la caractérisation des sources par antennerie permet un diagnostic fiable du train.

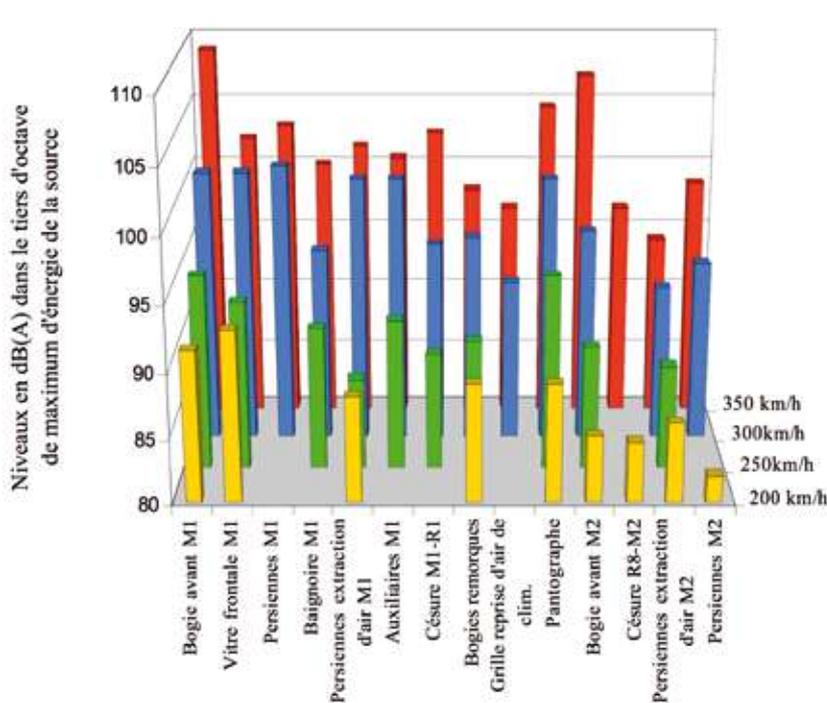


Fig. 4 : Contributions relatives des différentes sources de bruit à différentes vitesses

Antenne en soufflerie

En soufflerie, l'antennerie acoustique permet de caractériser le bruit généré par l'interaction d'un écoulement d'air avec un objet réel ou une maquette de celui-ci.

Les exemples présentés ici sont issus du projet MIMOSA¹ dont l'un des objectifs est d'étudier, en soufflerie, du point de vue acoustique, l'interaction entre deux obstacles : un cube et une barrette, pour différentes échelles. L'antennerie acoustique est utilisée au cours de ce projet pour identifier les maxima d'émission acoustique, mais aussi pour quantifier la puissance sonore émise pour chaque zone de la maquette.

Principe du traitement d'antenne

La mesure en soufflerie présente la particularité d'avoir la plupart du temps un plancher sur lequel se réfléchissent

les ondes acoustiques. Le montage le plus aisé est d'opter pour un plancher parfaitement réfléchissant et d'introduire cet aspect dans le modèle de propagation. Une autre particularité de la mesure en soufflerie est la nécessité de prendre en compte dans la propagation la convection des ondes acoustiques dans la veine et leur réfraction à l'interface. Le modèle de propagation est alors adapté en conséquence et conduit à une correction des retards de propagation et des amplitudes des signaux reçus.

Le modèle de propagation est détaillé page 20.

Le traitement d'antenne utilisé dans un premier temps est de type « Conventional Beamforming » (CBF). Deux estimateurs de cohérence (γ^2) et de puissance ($\hat{\sigma}$) sont calculés au point de focalisation F :

$$\gamma^2(F) = \frac{D^H(F) \Gamma D(F)}{\text{tr}(\Gamma) \|D(F)\|^2}$$

$$\hat{\sigma}(F) = \frac{D^H(F) \Gamma D(F)}{\|D(F)\|^4} \quad (5)$$

Avec D la matrice des fonctions de transfert source/microphones et G la matrice interspectrale des signaux de pression.

Le principal intérêt de ce traitement est sa robustesse et son indépendance par rapport au bruit. Il permet dans une première approche de localiser correctement les sources principales avec l'estimateur de cohérence puis de quantifier leur puissance avec l'estimateur de puissance.

Toutefois, la dimension finie de l'antenne biaise l'identification des sources en introduisant

dans la réponse de l'antenne des sources secondaires limitant alors la dynamique des cartographies. De plus, le sous échantillonnage spatial génère en haute fréquence l'apparition de sources fictives rendant délicate l'interprétation des cartographies.

Le travail sur la géométrie de l'antenne, préalable indispensable à toute mesure, a pour objectif d'optimiser les performances de l'antenne en minimisant ces biais. La géométrie choisie pour cette application est de type d'Underbrink [5] : les coordonnées des capteurs sont calculées à partir des intersections de cercles avec des spirales. Cette géométrie permet d'optimiser la densité de microphones et les distances entre les microphones pour repousser vers les hautes fréquences l'apparition des sources fictives.

Pour cette application, 31 capteurs ont été utilisés suivant deux géométries. Ces géométries sont représentées sur les figures 5 et 6.

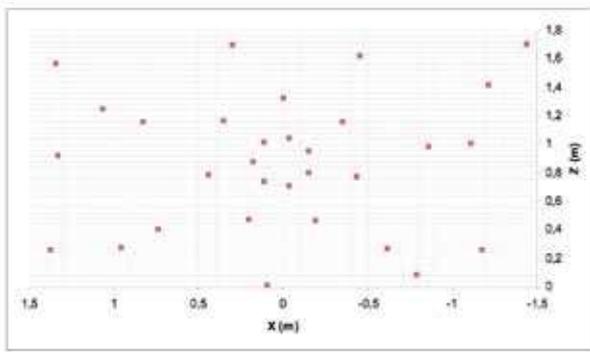


Fig. 5 : Grande géométrie

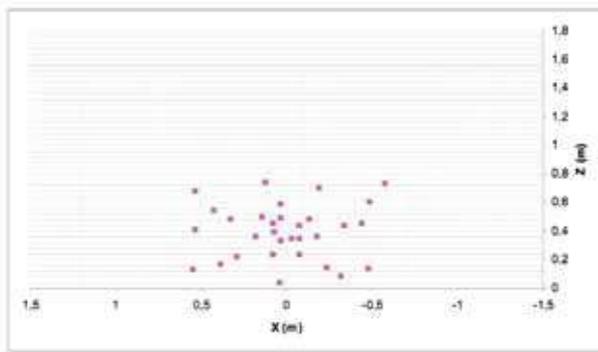


Fig. 6 : Petite géométrie

La maquette est constituée d'une barrette et d'un cube. Les mesures sont réalisées dans la soufflerie de l'Ecole Centrale de Lyon jusqu'à des vitesses de 70 m/s.



Fig. 7 : Cube et barrette sur plancher réfléchissant dans la soufflerie de l'Ecole Centrale de Lyon

Les exemples des figures 10 et 11 (page 18) illustrent les limitations de dynamique des cartographies de puissance, mais aussi les biais sur la localisation introduits par cet estimateur.

La localisation est correcte sur les maxima de l'estimateur de cohérence. Le niveau de puissance doit être attribué dans un second temps en lisant les valeurs de l'estimateur de puissance à ces maxima.

Estimation de puissance avec CLEAN

L'algorithme CLEAN [6] consiste à estimer pas à pas la distribution des sources en « nettoyant » de manière itérative la cartographie obtenue précédemment.

L'objectif est d'obtenir un estimateur non-biaisé en position et de corriger l'influence des lobes secondaires et des variations de largeur du lobe principal sur l'estimation de la puissance des sources.

Le principe de CLEAN est le suivant :

- calcul classique de CBF,
- recherche de la source la plus énergétique sur la bande fréquentielle souhaitée,
- simulation de la réponse de l'antenne à la source précédemment trouvée,
- la matrice interspectrale de la réponse simulée est multipliée par un facteur r compris entre 0,1 et 0,5,
- la matrice interspectrale obtenue est soustraite à la matrice initiale.

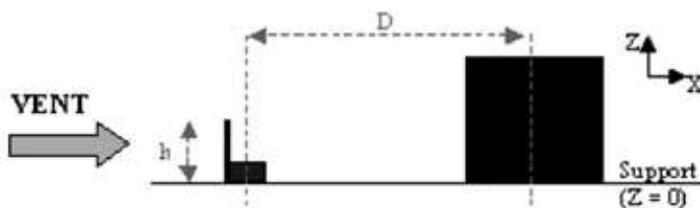


Fig. 8 : Dimensions et positions du cube et de la barrette

Exemples de localisation

Un exemple de cartographie est fourni sous la forme de l'estimateur de cohérence (figure 10) et de l'estimateur de puissance (figure 9) pour différentes fréquences.

Le niveau maximal des estimateurs de cohérence et de puissance est fourni en légende de chaque cartographie. La dynamique des cartographies est constante en fonction de la fréquence, de 0 à C_{max} pour l'estimateur de cohérence et de $P_{max} - 10$ dB à P_{max} pour l'estimateur de puissance.

Le processus est répété un grand nombre de fois jusqu'à ce que l'énergie de la matrice interspectrale soit inférieure à un seuil prédéterminé.

CLEAN fournit une liste de sources définies pour une fréquence, une position et un niveau de puissance. Il est possible de reconstruire une cartographie idéale (sans lobe secondaire) à partir de cette liste (figure 11). Ces cartographies correspondent aux résultats obtenus par CBF sur les figures 10 et 11.

La dynamique des cartographies est augmentée et les ambiguïtés sur certaines sources sont levées.

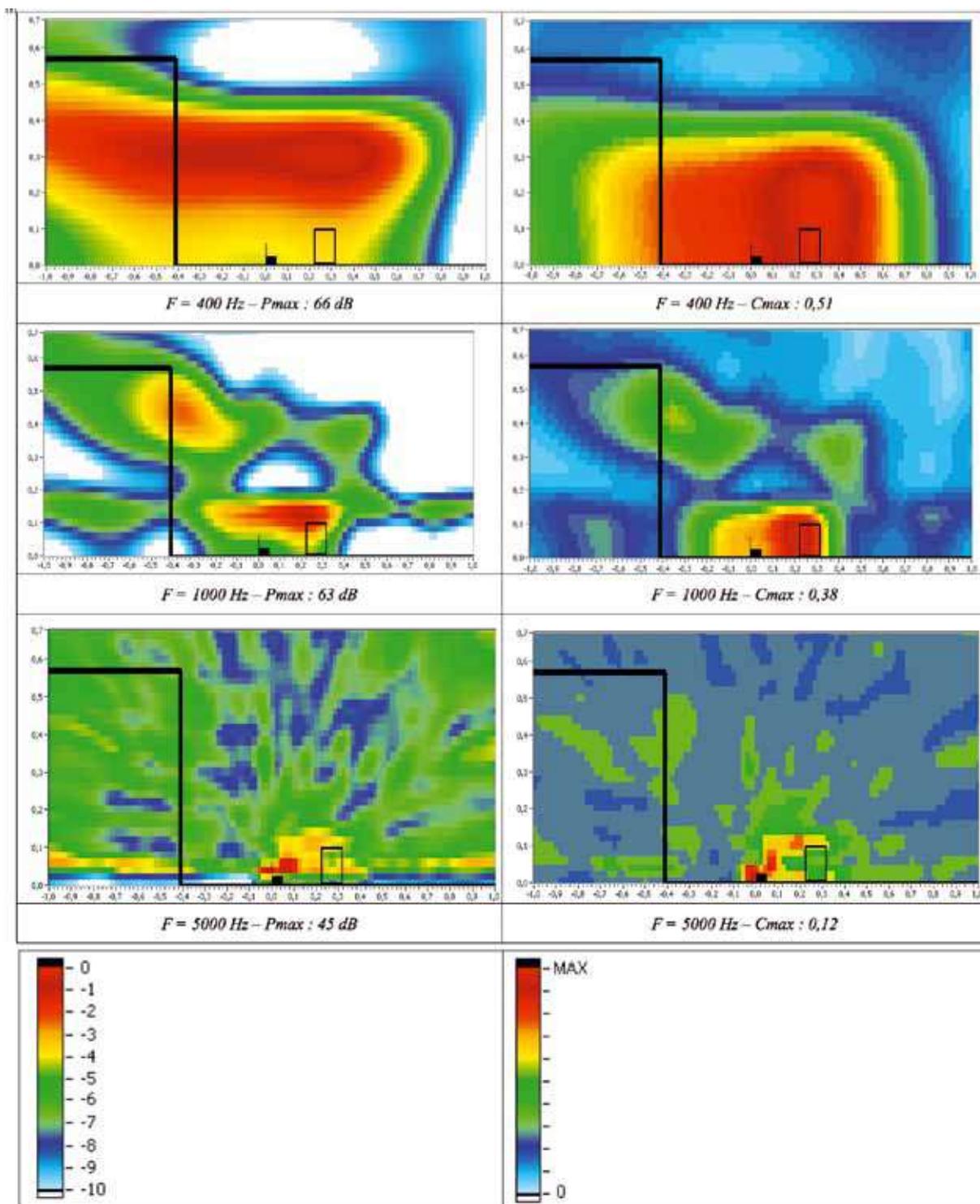


Fig. 9 : Estimateur de puissance (dB)

Fig. 10 : Estimateur de cohérence

Pour faciliter l'analyse des résultats, il est possible à partir de la liste des sources fournies par CLEAN de définir des zones de l'espace (figure 12) puis de sommer les sources pour obtenir des spectres de puissance émise par zones (figure 13).

Conclusions

Ce document illustre deux applications d'antenne acoustique dans des conditions différentes : les mesures au passage ne permettent pas de disposer d'une durée d'observation importante et donc toute la difficulté du traitement réside

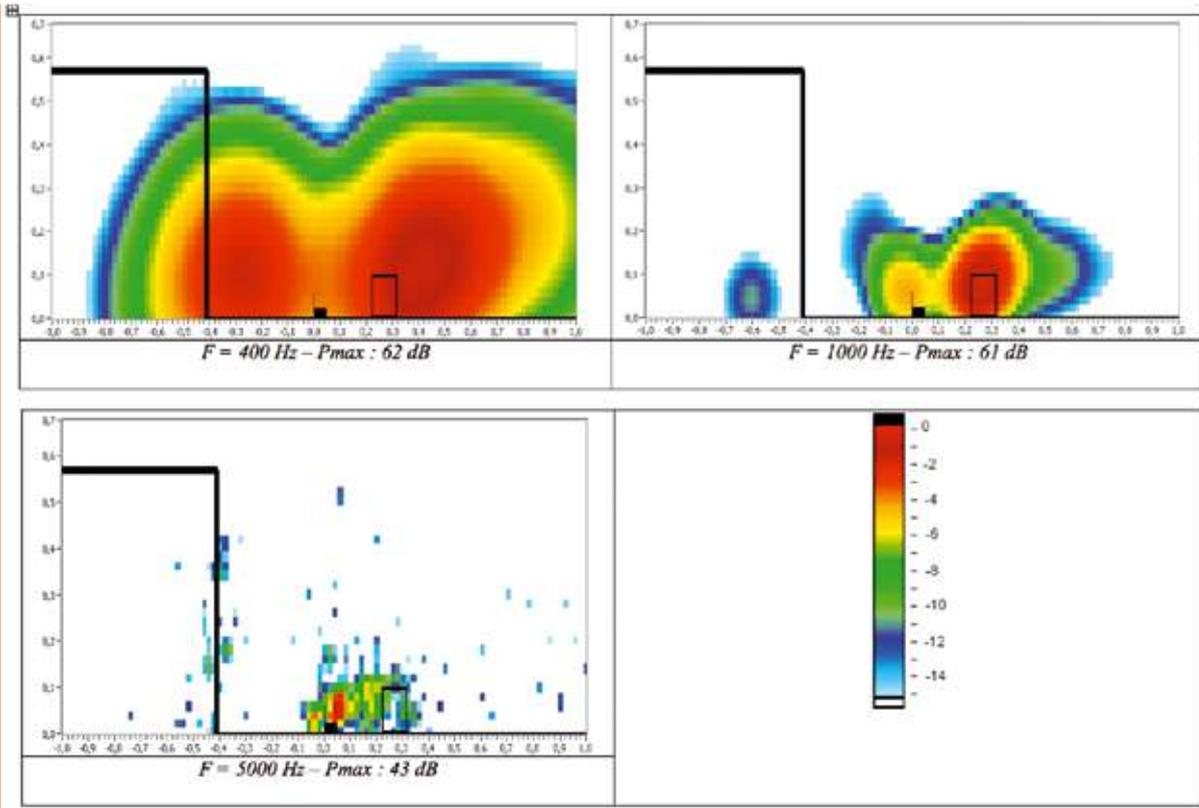


Fig. 11 : Cartographies obtenues avec CLEAN (dB)

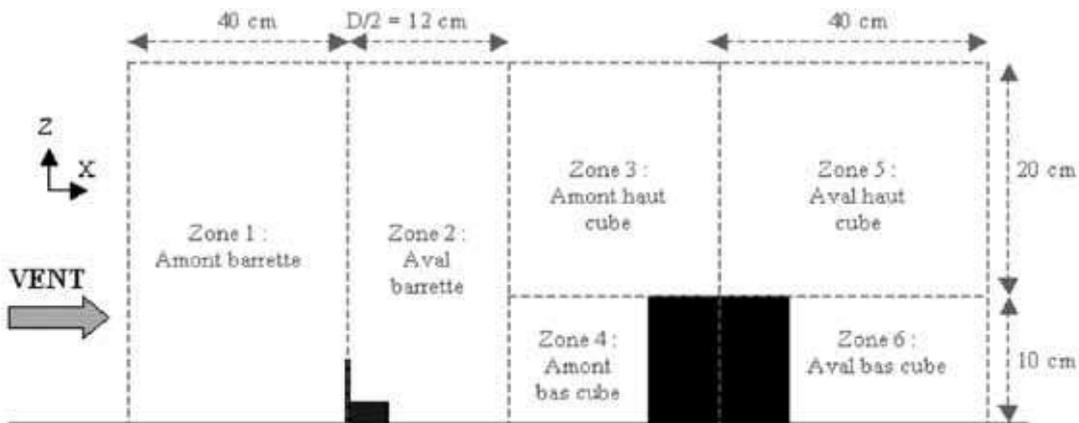


Fig. 12 : Définition des zones autour du cube et de la barrette

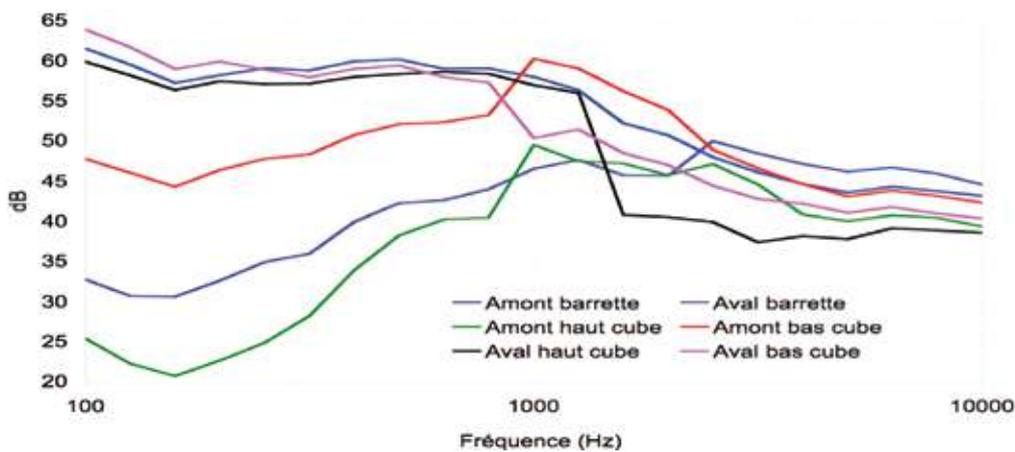


Fig. 13 : Puissance émise par zone

dans la reconstruction d'un signal non dopplérisé à partir des échantillons temporels. L'exploitation industrielle des résultats demande une synthèse des cartes de bruit obtenues sous une forme directement exploitable pour la prise de décision des sources à traiter.

L'application en soufflerie permet de disposer au contraire d'une durée d'analyse suffisante et d'un environnement de

propagation maîtrisé. L'introduction de cette connaissance dans le traitement d'antenne permet d'augmenter ses performances.

L'utilisation d'un algorithme de type CLEAN permet de faciliter l'interprétation des résultats en levant les ambiguïtés sur les sources fictives et en comparant en terme de puissance acoustique émise les différentes zones de l'espace.

Pour en savoir plus : Le principe du traitement d'antenne

Prise en compte des réflexions sur le plancher et de la convection dans le modèle de propagation
En présence d'un plancher réfléchissant, le modèle de propagation entre la source S et le récepteur Mi s'écrit :

$$d_i = \frac{1}{\|SM_i\|} e^{\left(-j2\pi f \frac{\|SM_i\|}{c}\right)} + \frac{1}{\|S'M_i\|} e^{\left(-j2\pi f \frac{\|S'M_i\|}{c}\right)} \quad (3)$$

Avec SMi et S'Mi les distances source-récepteur et source image-récepteur.

Le modèle de propagation peut être complété en prenant en compte la convection des ondes acoustiques dans la veine et leur réfraction à l'interface. Il s'écrit alors :

$$d_i = \frac{A_i}{\|SM_i\|} e^{\left(-j2\pi f \frac{\|SM_i\|}{c} + j2\pi f \Delta t_i\right)} + \frac{A'_i}{\|S'M_i\|} e^{\left(-j2\pi f \frac{\|S'M_i\|}{c} + j2\pi f \Delta t'_i\right)} \quad (4)$$

Les facteurs d'amplitude Ai et les retards Dti sont calculés en déterminant la trajectoire (=rayon) suivie par l'onde acoustique, dont on déduit le terme de correction de retard puis la correction d'amplitude.

Cette méthode est décrite par Soderman et Allen [7]. Elle a été développée par Amiet [8] en 1975, Plumlee [9] en 1976 et en parallèle la même année par Candel & al [10] à l'ONERA. Elle suppose que la couche de cisaillement soit mince, c'est-à-dire que son épaisseur soit faible par rapport aux autres distances. Cette couche de cisaillement est également supposée localement plane sur la trajectoire du rayon et la distance source-récepteur est grande devant la longueur d'onde (voir figure 14).

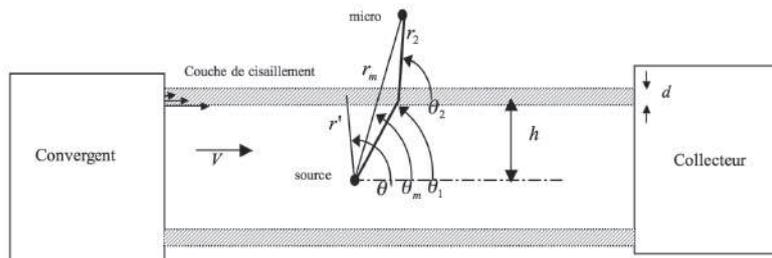


Fig. 14 : Géométrie du problème

Une étude menée sur des sources électroacoustiques maîtrisées dans la veine ÉOLE de Poitiers (460 mm x 460 mm) a validé le fait que cette méthode permette de calculer avec précision les retards temporels.

En ce qui concerne les facteurs d'amplitude, l'étude expérimentale a mis en évidence les difficultés de la méthode à prédire correctement les facteurs d'amplitude pour un couple source-récepteur. Des erreurs de l'ordre de 2 dB ont été constatées. L'effet de moyenne sur l'ensemble des capteurs permet toutefois de limiter l'erreur à 1 dB sur l'estimation du niveau réalisé par l'antenne.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier les partenaires du projet MIMOSA qui ont contribué à la réalisation des essais en soufflerie à l'Ecole Centrale de Lyon et ont autorisé l'exploitation de ces résultats récents à titre d'exemple.

Références bibliographiques

- [1] B. Barsikow and W.F. King, "On removing the Doppler frequency shift from array measurements of railway noise", *Journal of Sound and Vibration* 120(1):190-196, 1988
- [2] F. Poisson, "Localisation et caractérisation de sources acoustiques en mouvement", Thèse de doctorat de l'Université du Maine Spécialité acoustique 1996.
- [3] P. Fodiman, "Caractérisation expérimentale des bruits ferroviaires dans l'environnement", *Bulletin technique du CIDB*, 82:28, 1993.
- [4] C.A. Balanis, "Antenna theory, analysis and design" Harper and Row, series in electrical engineering, 1982.
- [5] *Aeroacoustic Measurements*, T J Mueller Editor, Springer-Verlag, 2002
- [6] Y. Wang, J Li, P. Soica, M. Sheplak, T. Nishida, "Wideband RELAX and Wideband CLEAN for aeroacoustic imaging" *J. Acoust. Soc. Am* 115(2) : 757-767, 2004.
- [7] P.T Soderman & C.S Allen, "Microphone measurements in and out of airstream", in *Aeroacoustic Measurements*, T J Mueller Editor, Springer Verlag, 2002
- [8] R.K Amiet, "Correction of open jet wind tunnel measurements for shear layer refraction", *AAIA Paper* 75-532, 1975.
- [9] H.E Plumblee, "effect of forward velocity on turbulent jet mixing noise" *NASA CR-2702*, 1976
- [10] S.M Candel, A. Guedel, A. Julienne, "Radiation, refraction and scattering of acoustic waves in a free shear flow", *AAIA Paper* 76-544, 1976. ■