



HAL
open science

Identification de sources acoustiques au passage d'un véhicule routier par imagerie acoustique parcimonieuse dans le domaine temporel

Rémi Cousson

► **To cite this version:**

Rémi Cousson. Identification de sources acoustiques au passage d'un véhicule routier par imagerie acoustique parcimonieuse dans le domaine temporel. Acoustique [physics.class-ph]. INSA Lyon, 2018. Français. NNT: . tel-02078608v1

HAL Id: tel-02078608

<https://hal.science/tel-02078608v1>

Submitted on 25 Mar 2019 (v1), last revised 17 Jul 2019 (v2)

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.



N° d'ordre NNT : 2018LYSEI106

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de
Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

Ecole Doctorale N° ED162
MEGA de Lyon
(Mécanique, Energétique, Génie civil, Acoustique)

Spécialité de doctorat : Acoustique

Soutenue publiquement le 14/12/2018, par :
Rémi COUSSON

**Identification de sources acoustiques
au passage d'un véhicule routier par
imagerie acoustique parcimonieuse
dans le domaine temporel**

Devant le jury composé de :

Thomas, Jean-Hugh	Professeur des Universités	Université du Maine	Rapporteur
Ollivier, François	Maître de Conférences	UPMC	Rapporteur
Garcia, Alexandre	Professeur des Universités	CNAM	Président du jury
Antoni, Jérôme	Professeur des Universités	INSA Lyon	Examineur
Pallas, Marie-Agnès	Chargée de Recherche	IFSTTAR	Examinatrice
Leclère, Quentin	Maître de Conférences	INSA Lyon	Directeur de thèse
Bérengier, Michel	Directeur de Recherche	IFSTTAR	Invité, co-directeur de thèse

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES - LYON

ÉCOLE DOCTORALE MEGA

MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVILE ET ACOUSTIQUE

THÈSE

pour obtenir le titre de

Docteur en Sciences

de l'Institut National des Sciences Appliquées - Lyon

Mention : ACOUSTIQUE

Présentée et soutenue par

Rémi COUSSON

Identification de sources acoustiques au passage d'un véhicule routier par une méthode d'imagerie acoustique parcimonieuse dans le domaine temporel.

Thèse encadrée par Marie-Agnès PALLAS

et dirigée par Michel BÉRENGIER et Quentin LECLÈRE

préparée à l'UMRAE (IFSTTAR Bron) et au LVA (INSA Lyon)

soutenue le 14 Décembre 2018

Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2016-2020

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	CHIMIE DE LYON http://www.edchimie-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage secretariat@edchimie-lyon.fr INSA : R. GOURDON	M. Stéphane DANIELE Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon IRCELYON-UMR 5256 Équipe CDFA 2 Avenue Albert EINSTEIN 69 626 Villeurbanne CEDEX directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE http://edeea.ec-lyon.fr Sec. : M.C. HAVGOUDOUKIAN ecole-doctorale.eea@ec-lyon.fr	M. Gérard SCORLETTI École Centrale de Lyon 36 Avenue Guy DE COLLONGUE 69 134 Écully Tél : 04.72.18.60.97 Fax 04.78.43.37.17 gerard.scorletti@ec-lyon.fr
E2M2	ÉVOLUTION, ÉCOSYSTÈME, MICROBIOLOGIE, MODÉLISATION http://e2m2.universite-lyon.fr Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : H. CHARLES secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr	M. Philippe NORMAND UMR 5557 Lab. d'Ecologie Microbienne Université Claude Bernard Lyon 1 Bâtiment Mendel 43, boulevard du 11 Novembre 1918 69 622 Villeurbanne CEDEX philippe.normand@univ-lyon1.fr
EDISS	INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTÉ http://www.ediss-lyon.fr Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : M. LAGARDE secretariat.ediss@univ-lyon1.fr	Mme Emmanuelle CANET-SOULAS INSERM U1060, CarMeN lab, Univ. Lyon 1 Bâtiment IMBL 11 Avenue Jean CAPELLE INSA de Lyon 69 621 Villeurbanne Tél : 04.72.68.49.09 Fax : 04.72.68.49.16 emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr
INFOMATHS	INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES http://edinfomaths.universite-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage Tél : 04.72.43.80.46 Fax : 04.72.43.16.87 infomaths@univ-lyon1.fr	M. Luca ZAMBONI Bât. Braconnier 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69 622 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.26.23.45.52 zamboni@maths.univ-lyon1.fr
Matériaux	MATÉRIAUX DE LYON http://ed34.universite-lyon.fr Sec. : Marion COMBE Tél : 04.72.43.71.70 Fax : 04.72.43.87.12 Bât. Direction ed.materiaux@insa-lyon.fr	M. Jean-Yves BUFFIÈRE INSA de Lyon MATEIS - Bât. Saint-Exupéry 7 Avenue Jean CAPELLE 69 621 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.72.43.71.70 Fax : 04.72.43.85.28 jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr
MEGA	MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE http://edmega.universite-lyon.fr Sec. : Marion COMBE Tél : 04.72.43.71.70 Fax : 04.72.43.87.12 Bât. Direction mega@insa-lyon.fr	M. Jocelyn BONJOUR INSA de Lyon Laboratoire CETHIL Bâtiment Sadi-Carnot 9, rue de la Physique 69 621 Villeurbanne CEDEX jocelyn.bonjour@insa-lyon.fr
ScSo	ScSo* http://ed483.univ-lyon2.fr Sec. : Viviane POLSINELLI Brigitte DUBOIS INSA : J.Y. TOUSSAINT Tél : 04.78.69.72.76 viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr	M. Christian MONTES Université Lyon 2 86 Rue Pasteur 69 365 Lyon CEDEX 07 christian.montes@univ-lyon2.fr

*ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

Résumé : Le présent travail de recherche s'inscrit dans le cadre de la caractérisation de l'émission de bruit des véhicules routiers. On désire identifier les sources de bruit d'un véhicule en mouvement, lors de son passage sur une voie de circulation en conditions réelles, à partir de mesures acoustiques effectuées à poste fixe en bord de voie. Les méthodes d'imagerie acoustique utilisées actuellement présentent des performances insuffisantes sur véhicules routiers.

Un état de l'art a permis d'identifier une méthode existante, MSA-PSF, consistant à effectuer sous certaines hypothèses une déconvolution sur sources mobiles dans le domaine fréquentiel, et originellement utilisée en aéronautique. Cette méthode est ici adaptée au contexte des véhicules routiers.

Dans un deuxième temps, une approche originale est introduite pour répondre spécifiquement aux contraintes de ce contexte : CLEAN-T. Il s'agit d'une méthode itérative, dans le domaine temporel avec une approche large bande, qui prend en compte les effets du déplacement des sources et qui comporte deux paramètres permettant d'affiner les résultats : le facteur de boucle et le critère d'arrêt. Une version filtrée en fréquence est également proposée et montre une amélioration de l'identification de sources secondaires dans certains cas. CLEAN-T présente l'avantage d'obtenir des signaux-sources temporels reconstruits, ouvrant la voie à d'autres analyses, en particulier l'utilisation de la cohérence avec des signaux issus de mesures embarquées pour la séparation des contributions de sources décorréélées.

MSA-PSF et CLEAN-T sont évaluées sur des simulations numériques à l'aide d'indicateurs mesurant leurs performances sur les aspects localisation et quantification de sources. Elles sont par la suite testées expérimentalement en conditions contrôlées de laboratoire, par l'utilisation d'une source mobile. Cette expérience permet une première application à un cas pratique, impliquant un mouvement linéaire, la présence de deux sources simultanées et des signaux de différentes natures (tonale et large bande). Enfin, elles sont comparées à l'approche classique de formation de voies sur source mobile, dans le cadre d'une expérience avec véhicule en conditions réelles.

L'approche originale CLEAN-T fournit des résultats très encourageants, représentant une amélioration de la formation de voies classique, notamment en basse fréquence sur les cas testés. L'application à un véhicule en conditions réelles illustre certains comportements potentiellement problématiques de CLEAN-T et les solutions apportées par sa version filtrée en fréquence ou par l'ajustement de ses différents paramètres. Un premier test des approches par référencement avec des signaux issus de mesures embarquées est également présenté pour discriminer l'origine physique des sources, et souligne l'incidence de la brièveté des signaux inhérente au contexte de sources au passage.

Mots clés : antennerie, formation de voies, déconvolution, sources mobiles, effet Doppler, véhicules routiers, séparation de sources

Identification of acoustic sources in a road vehicle pass-by situation with a sparse time-domain acoustic imaging method.

Abstract : The study detailed in this manuscript is part of the effort to characterize the noise emission from road vehicles. We wish to identify the noise sources of a moving vehicle, when driven on a roadway in real-world conditions, with roadside acoustic measurements. The current acoustic imaging methods do not provide sufficient performance on road vehicles.

A state of the art led to the selection of an existing method, MSA-PSF, which consists in deconvolving signals from mobile sources in the frequency domain under certain assumptions, and was originally developed for aeroacoustics. This method is adapted here to the context of road vehicles.

Then, an original approach is proposed in order to tackle the specific constraints of this context : CLEAN-T. This is an iterative method, performed in time domain with a wideband approach, which takes into account the effect of sources motion and includes two parameters designed to refine the result : the loop factor and the stopping criterium. A further version of the algorithm, including a frequency filter, is also proposed and shows significant improvement in identifying secondary sources in some particular cases. An interesting point of CLEAN-T is the availability of the sources reconstructed time signals, which enables other types of analysis, especially the use of the coherence with signals from on-board measurements in order to separate the contributions of uncorrelated sources.

MSA-PSF and CLEAN-T are evaluated with numerical simulations and a set of indicators to measure their source localization and quantification performance. They are then tested in a controlled laboratory conditions experiment, using a moving source. This experiment represents a first application of the methods to a practical case, involving a linear motion, two simultaneous sources and different kinds of signals (tone and wideband). They are finally compared to the classical approach of moving source beamforming, within the frame of an experiment on a road vehicle, in real-world conditions.

The original approach CLEAN-T yields very encouraging results, and is a clear improvement from the conventional beamforming, especially at low frequency for the tested cases. Applying it to a road vehicle in real-world conditions highlights a potentially troublesome behavior of the method, and the solution brought by CLEAN-T's frequency filtered version, or by adapting its various parameters. The coherence with reference signals to discriminate the physical origins of the sources is also tested and underlines the role of the short duration of the signals related to the sources passing-by context.

Keywords : microphone array, beamforming, deconvolution, moving sources, Doppler effect, road vehicles, source separation

Remerciements

Si certains ont encore en tête l'image du chercheur solitaire, enfermé à longueur de journée dans un bureau ou un laboratoire à l'éclairage blafard, et ne sortant de son antre qu'à l'occasion des nécessaires injections de caféine par voie orale afin de mener à bien cette recherche si précieuse que, de toute manière, seul lui et quelques autres de son espèce sont capables de comprendre, je pense qu'il est bon de souligner que le travail dans la recherche ne se fait jamais seul.

D'autres encore ont la vision fantasmée des scientifiques à tout faire, spécialistes à la fois en mécanique quantique, neurosciences et virologie, œuvrant dans des laboratoires aux grandes baies vitrées et couloirs blancs, tous en blouse et capables de créer les plus folles technologies dans les délais les plus ridiculement courts ; dans la vraie vie, et contrairement à cette vision véhiculée par les productions hollywoodiennes, la recherche requiert du temps, de la patience, de se tromper parfois ou même souvent, avant de trouver le bon chemin. Et les avancées réalisées ne représentent bien souvent, à l'échelle de la connaissance humaine, qu'une toute petite pierre sur la montagne qui représente le domaine spécifique dans lequel on s'est engagé.

Faire une thèse, c'est s'attaquer à cette montagne, et se confronter à ses propres limites et faiblesses. C'est bien souvent en faisant cela que l'on se rend compte de tout ce que l'on ne sait pas, et de la valeur de l'accompagnement que l'on reçoit pour, malgré tout, mener à bien un tel projet. C'est pour cette raison que mes premiers remerciements vont à mes encadrants, qui en plus d'être des chercheurs et chercheuse excellents, sont aussi des personnes tout aussi exceptionnelles humainement, et je me sens réellement chanceux d'avoir pu travailler avec eux.

Merci donc à Marie-Agnès Pallas, pour tout ce qui fait de toi une encadrante idéale : ta disponibilité sans faille, ta pédagogie et ta patience, ta grande rigueur qui amène souvent à des tonnes de corrections mais qui sont toujours nécessaires, et pour moi l'assurance que mon travail sera de qualité. Merci pour m'avoir tant apporté et aidé à grandir en tant que scientifique, pour ta gentillesse, et pour tes macarons faits maison !

Merci à Quentin Leclère d'avoir accepté d'être un de mes directeurs de thèse. Je me souviens encore de la première conversation qu'on a eue, quand je te disais que j'avais quelques amis qui étaient/avaient été en thèse, ce à quoi tu m'avais répondu : "Et ils t'ont pas dit de pas le faire?". Merci pour toute ton aide dans mon travail, mais aussi pour ta décontraction et ton sens de l'humour en dehors.

Enfin je remercie Michel Bérengier, mon autre directeur de thèse et néo-retraité. Merci pour ton temps, ton soutien et ta gentillesse, et pour toutes les remarques pertinentes sur mes expériences, articles et présentations, quand bien même ce n'était pas exactement ton sujet de prédilection, car elles nous apportaient toujours un point de vue plus extérieur plus que bien-venu.

J'ai eu la chance de travailler au sein de deux laboratoires remplis de personnes sympas et toujours prêtes à aider. En vrac, je remercie donc Olivier, Joël, Philippe, Alexandra, Nicolas, Etienne, Judicaël et tous les Nantais de l'Ifsttar, et j'en oublie. Remerciements spéciaux pour Jean-Michel, Vincent et Patrick, grâce à qui j'ai pu mener à bien mes diverses expériences, ce qui n'a pas toujours été sans mal !

Heureusement, la thèse n'est pas uniquement un parcours du combattant intellectuel, elle

permet aussi de belles rencontres, et je tiens à présent à remercier mes amis et camarades de tranchée. Pour nos discussions basket enflammées, pour les musiciens du labo, pour la super ambiance au LVA, et le sentiment de faire partie d'un groupe spécial, merci à Coco, Chris, Raïssa, Mehdi, Felipe, Benjamin, mais aussi Philéas, Ting, Fabien, Giorgio et Emmanuel. Mention spéciale au LVA Big Band Theory, groupe exceptionnel et éphémère s'il en est, dont la seule date fut le repas de Noël du LVA 2015 : Coco, Chris, Mehdi, Edouard et Val.

J'ai des remerciements particuliers pour mes camarades de bureau, pour les conseils parfois, pour les craquages souvent : Gigi, mon gars, le basket le mardi midi, et tout le reste ; Edouard, la sagesse, les soirées jeux et la gratte ; Val, l'homme qui arrivait toujours le premier au bureau, et le meilleur joueur de ukulele que j'ai vu de ma vie ; Souha, le bordel qui s'étale sur mon bureau, le chant (faux) mais qu'on tolère (dans une certaine limite), et les talk-sow américains ; et William, camarade fan des Spurs, et qui m'a révélé Trashtalk. À vous tous, merci, vous êtes la Dream Team !

Du côté de l'Ifsttar aussi, de vraies belles rencontres : au sein de mon labo même, Adrien et Simon, c'était vraiment cool de vous avoir pour ma dernière année, et mention spéciale pour nos jams en plein air en été et nos répétitions à l'arrache ! Les autres doctorants et CDD de l'Ifsttar, merci pour les mercredis midi et les parties de tarot magistrales, et tous les apéros plein air dans Lyon : Marine, Amandine, Anaïs, P-A, Antoine, Simon, Cédric, Dan et j'en oublie !

Même si je n'ai pas toujours pu les voir aussi souvent que je l'aurais voulu, je tiens à remercier mes amis non-collègues, les lyonnais David, Meyah, Olivier et Etienne ; ceux qui vivent (beaucoup) plus loin, Pilou, Cyril, Robin et Caro, les amis des Mines Tarek, Maxou, Mugoreve, Cata, Gabi, Elé, Alex, Diane, Lolo et Simon, et tous les autres, la liste serait bien longue.

Enfin, mes remerciements vont vers ma famille, merci pour votre soutien et votre amour, grâce à vous j'ai pu toujours avoir du recul sur mes difficultés et me rappeler que l'essentiel est ailleurs.

« *All we have to decide is what to do with the time that is given us.* »

J.R.R. Tolkien

Table des matières

Remerciements	v
Liste des Notations	xi
Introduction générale	1
1 Revue bibliographique - État de l'art	5
1.1 Sources de bruit d'un véhicule	6
1.1.1 Groupe moto-propulseur	7
1.1.2 Bruit de roulement	10
1.2 Méthodes d'imagerie acoustique	12
1.2.1 Introduction	12
1.2.2 Formation de voies et déconvolution – cas de sources statiques	15
1.2.3 Formation de voies et déconvolution – cas des sources mobiles	33
1.3 Séparation de sources	48
1.3.1 Fonction de cohérence et filtrage de signaux	48
1.3.2 Application pour la séparation de sources acoustiques	53
2 Méthode temporelle adaptée aux véhicules routiers : CLEAN T	59
2.1 Introduction et spécificité du bruit au passage dans un contexte routier	59
2.2 Éléments théoriques de CLEAN T	61
2.2.1 Principe de CLEAN T	61
2.2.2 Formalisme de CLEAN T	62
2.2.3 Avantages spécifiques à la formulation temporelle de CLEAN T	65
2.2.4 Filtrage fréquentiel	65
2.2.5 Filtrage par cohérence avec un signal de référence	70
2.3 Analyse numérique comparative des performances de CLEAN T	72
2.3.1 Paramètres de simulation et indicateurs de performance	72
2.3.2 Analyse paramétrique	74
2.3.3 Robustesse de la méthode en cas d'écart sur les paramètres	79
2.3.4 Séparation de deux sources proches	82
2.3.5 Synthèse des résultats des simulations numériques	84
2.4 Synthèse sur la méthode CLEAN T	86
3 Application expérimentale : cas d'un pendule	87
3.1 Conditions expérimentales	87
3.1.1 Montage expérimental	87
3.1.2 Configurations de test	91
3.2 Cas statique	92
3.2.1 Sources tonales	93

3.2.2	Sources large bande	93
3.3	Cas mobile	95
3.3.1	Sources tonales	95
3.3.2	Sources large bande	96
3.4	Filtrage par cohérence	97
3.5	Synthèse de l'application expérimentale des méthodes en condition de laboratoire	99
4	Analyse expérimentale : bruit au passage d'un véhicule	103
4.1	Conditions expérimentales	104
4.1.1	Montage expérimental	104
4.1.2	Source sonore contrôlée	107
4.2	Paramètres des méthodes	109
4.3	Mesure statique	110
4.3.1	Configurations de mesure	110
4.3.2	Résultats de mesure	113
4.3.3	Bilan de la mesure statique	117
4.4	Mesure au passage d'un véhicule	118
4.4.1	Configurations de passage	118
4.4.2	Résultats de mesure avec la source contrôlée	118
4.4.3	Résultats de mesure sans la source contrôlée	124
4.4.4	Bilan de la mesure au passage	127
4.5	Utilisation des signaux de référence pour la séparation de sources	128
4.5.1	Cas statique : zone du passage de roue	128
4.5.2	Cas mobile	134
4.5.3	Bilan du référencement pour la séparation de sources	139
4.6	Synthèse de l'application des méthodes en conditions réelles	139
	Conclusions et perspectives	143
A	Fonction de localisation alternative	147
A.1	Configuration statique	147
A.2	Configuration mobile	149
B	Évolution de la cartographie résiduelle de CLEANT	151
C	Cartographies cohérentes complémentaires	153
D	Réponses d'antenne	157
	Bibliographie	159

Liste des Notations

Dans cette thèse les grandeurs scalaires, réelles ou complexes, sont notées en lettres non grasses telles que $s(t)$ ou $S(f)$. Les vecteurs sont notés en gras, tels que $\mathbf{p}(t)$, et les matrices sont notées en gras et surmontées d'une barre, telles que $\bar{\mathbf{H}}$. L'accent circonflexe au-dessus d'une variable traduit sa transformée de Fourier, tel que $\hat{s}(f)$, mais peut parfois être omis (cela est précisé le cas échéant) pour alléger les notations.

ABRÉVIATIONS

HP	Haut-Parleur.
ACP	Analyse spectrale en Composantes Principales.
ASC	Analyse Spectrale Conditionnée.
CLEAN-SC	CLEAN based on spatial Source Coherence.
CLEANT	CLEAN Temporel.
DAMAS	Deconvolution Algorithm for the Mapping of Acoustic Sources.
FFT	Fast Fourier Transform.
FV	Formation de Voies.
GMP	Groupe Moto-Propulseur.
HR-CLEAN-SC	High Resolution CLEAN-SC.
MSA-PSF	Moving Source Adapted Point Spread Function.
NNLS	Non-Negative Least Squares.
PSF	Point Spread Function.
RSB	Rapport Signal-sur-Bruit.
VL	Véhicule Léger.

VARIABLES

$[x, y, z]$	Coordonnées spatiales de l'observateur O .
$[x_s, y_s, z_s]$	Coordonnées spatiales du point S .
$\alpha_i(\omega_p)$	Amplitude complexe de la source i à la fréquence ω_p .
$\bar{\Gamma}(f)$	Matrice interspectrale de l'antenne de microphones à la fréquence f .
$\bar{\mathbf{H}}(f)$	Matrice traduisant la réponse du traitement d'antenne au modèle de source ponctuelle (<i>Point Spread Functions</i>), à la fréquence f .

Λ	Cartographie source (ou clean-map) des algorithmes CLEAN et CLEAN-T.
Ω	Cartographie résiduelle (ou dirty-map) des algorithmes CLEAN et CLEAN-T.
$B(f)$	Vecteur des sorties quadratiques de la formation de voies pour les points de focalisation analysés, à la fréquence f .
$S(f)$	Vecteur des autospectres des sources à la fréquence f .
$W(f, F)$	Vecteur de pointage (steering vector) sur le point focal F à la fréquence f .
\mathcal{T}	Intervalle d'enregistrement.
Δt	Décalage temporel entre deux microphones consécutifs de l'antenne à la réception de l'onde incidente.
δ	Différence de marche entre les microphones de l'antenne.
$\dot{q}(t)$	Variation de débit massique d'une source.
γ	Facteur de boucle des algorithmes CLEAN et CLEAN-T.
$\Gamma_S(f)$	Autospectre de la source à la fréquence f .
$\gamma_{2y-1}^2(f)$	Fonction de cohérence partielle entre $x_2(t)$ et $y(t)$, les effets de $x_1(t)$ vus à travers une transformation linéaire étant retirés à la fois de $x_2(t)$ et $y(t)$.
$\Gamma_{iy-1}(f)$	Interspectre entre l'entrée $x_i(t)$, $i \neq 1$, et la sortie $y(t)$ sans la contribution de la source 1.
$\Gamma_{xx}(f)$	Autospectre de $x(t)$ à la fréquence f .
$\Gamma_{xy}(f)$	Interspectre entre $x(t)$ et $y(t)$ à la fréquence f .
$\gamma_{xy}^2(f)$	Fonction de cohérence ordinaire entre $x(t)$ et $y(t)$, à la fréquence f .
$\Gamma_{y:x_i}(f)$	Autospectre de la partie de $y(t)$ due uniquement à l'entrée $x_i(t)$, à la fréquence f .
$\mathcal{W}(t)$	Fenêtre d'apodisation temporelle.
ω_0	Pulsation de l'onde émise par la source.
$\Phi(t)$	Phase instantanée du champ de pression.
θ	Direction d'écoute de l'antenne.
θ_0	Angle entre la direction de l'onde incidente sur l'antenne et la normale à l'axe de l'antenne linéaire.
θ_{im}	Angle entre la droite passant par le point de la grille i et le capteur m , et la normale à l'antenne.
$\hat{p}_O(f)$	Transformée de Fourier à la fréquence f de la pression $p_O(t)$ captée par un observateur placé au point O .

$\widehat{s}(f)$	Transformée de Fourier à la fréquence f de $s(t)$.
$\widehat{x}_{2,1}(f)$	Variable aléatoire conditionnée représentant la transformée de Fourier à la fréquence f de $x_2(t)$, les effets de $x_1(t)$ vus à travers une transformation linéaire étant retirés.
$\widehat{y}_{y,1}(f)$	Variable aléatoire conditionnée représentant la transformée de Fourier à la fréquence f de $y(t)$, les effets de $x_1(t)$ vus à travers une transformation linéaire étant retirés.
$B(f, F)$	Grandeur quadratique en sortie de la formation de voies focalisée au point F et à la fréquence f .
$b(t, \theta)$	Signal temporel en sortie de formation de voies préformée dans la direction θ .
$b(t, F)$	Signal temporel en sortie de formation de voies focalisée au point F .
$b(t, F, \{p_m\})$	Signal temporel en sortie de formation de voies, pour le point focal F , avec les signaux $p_m(t)$ reçus par les capteurs de l'antenne.
$b(t, F, \{p_m^{\text{res}(i)}\})$	Signal temporel en sortie de formation de voies, pour le point focal F , avec les signaux résiduels $p_m^{\text{res}(i)}(t)$ calculés pour les capteurs de l'antenne à l'itération i de CLEAN.
c	Célérité des ondes acoustiques dans l'air.
$C_{m,n}(t_1, t_2)$	Fonction d'intercorrélacion de deux variables aléatoires p_m et p_n , respectivement aux instants t_1 et t_2 .
D	Distance source-antenne.
d	Distance inter-capteur.
Df	Coefficient Doppler.
F	Point de focalisation de l'antenne.
f_0	Fréquence de l'onde émise par la source.
$G(r, f)$	Transformation spatio-fréquentielle traduisant la propagation d'une onde acoustique à une distance r de la source et à une fréquence f .
$H_{FV}(f, \theta, \theta_0)$	Réponse du filtre spatial réalisé par la formation de voies préformée dans la direction θ , pour une onde de fréquence f et d'incidence θ_0 .
$K_F(t)$	Terme de normalisation de la formation de voies.
L_{lobe}	Largeur du lobe central de formation de voies.
M	Nombre de Mach.
N_f	Nombre total de fréquences discrètes considérées.
N_K	Nombre total de réalisations statistiques d'une expérience (ou nombre total de snapshots temporels) pour l'application de MSA-PSF.

N_M	Nombre total de microphones de l'antenne.
N_S	Nombre total de sources.
$p_m(t)$	Pression acoustique reçue par le microphone m .
$q(t)$	Débit massique instantané de la source.
R	Distance entre la source S et l'observateur O à l'instant d'émission t_e .
r_{Fm}	Distance entre le point focal F et le capteur m à l'instant de réception t .
R_{im}	Distance entre le point de la grille i et le capteur m à l'instant d'émission t_e .
r_{Sm}	Distance entre la source $S(x_s, y_s)$ et le capteur m à l'instant de réception t .
$s(t)$	Signal émis par la source.
$S_j(f)$	Autospectre de la source j à la fréquence f dans le cas de sources multiples.
t	Variable temporelle de réception par l'observateur de l'onde émise par la source S .
$T^{(e)}$	Durée d'émission d'un snapshot temporel.
$t_0^{(e)}$	Instant central d'un snapshot.
t_e	Variable temporelle d'émission de l'onde par la source S .
v	Vitesse de déplacement de la source en mouvement.
w_m	Coefficient de pondération du capteur m .

Introduction générale

L'identification de sources de bruit regroupe deux aspects principaux : leur localisation dans l'espace d'une part, et leur quantification d'autre part. Le champ de l'acoustique qui étudie cette problématique est appelé *imagerie acoustique*, et inclut plusieurs méthodes dont l'objectif peut être soit la localisation, soit la quantification, soit les deux en même temps. Il s'agit dans tous les cas d'un sujet liant l'acoustique et le traitement du signal, de nombreuses notions de cette dernière discipline étant essentielles dans la conception et le fonctionnement de ces méthodes.

Cette introduction propose de situer le cadre de la présente thèse, en particulier ce qui a motivé la proposition de ce sujet, avant de lister ses objectifs initiaux.

Contexte

La population en milieu urbain et près des grandes infrastructures peut être affectée par la pollution sonore, dont une grande part est générée par le trafic routier. La Directive Européenne 2002/49/EC [Publications Office of the European Union 2002] est un outil d'évaluation et de gestion du bruit dans l'environnement qui s'appuie sur l'élaboration de cartes d'exposition au bruit pour mettre en place des plans de prévention. Un aspect réglementaire important de cette directive concerne l'information de la population, entre autres par la mise à disposition de ces cartes de bruit. La réalisation de celles-ci s'appuie sur une modélisation des sources de bruit ainsi que de la propagation du bruit qu'elles émettent. Pour ce qui concerne le bruit de trafic routier plus spécifiquement, leur précision dépend donc en partie de la connaissance du bruit émis par les véhicules. Afin d'affiner et de compléter cette connaissance, il est nécessaire de déterminer les différentes contributions des sources de bruit au sein d'un même véhicule, dans des conditions réelles de conduite.

L'IFSTTAR est un institut de recherche finalisée travaillant sur des thématiques autour de la ville, des transports et du génie civil. Une partie de ses recherches, effectuées au sein de l'Unité Mixte de Recherche en Acoustique Environnementale (UMRAE), porte en particulier sur les émissions de bruit des véhicules afin d'évaluer l'impact environnemental du trafic routier ou ferroviaire : voitures, trains, trams, poids lourds. Bien que l'émission de bruit des véhicules fasse l'objet d'une réglementation européenne (par exemple la norme [ISO 362-1 :2015] pour les véhicules, et le [Règlement (CE) 661/2009] pour les pneumatiques), celle-ci ne spécifie que quelques conditions d'utilisation typiques, associées à des valeurs limites imposées à la mise sur le marché. L'ambition du laboratoire est d'étudier tous les points de fonctionnement potentiels pouvant impacter les usagers et riverains, c'est-à-dire dans une grande variété de vitesses et d'allure par exemple (en accélération, en régime stable, etc.). Pour réaliser cet objectif, l'UMRAE analyse les émissions de bruit afin de pouvoir les modéliser dans un grand nombre de situations.

Les méthodes nationales ou européennes pour la prévision de bruit et le calcul d'impact environnemental s'appuient sur des modèles simplifiés émanant de modèles plus complexes. Pour alimenter ces derniers, il est nécessaire de disposer de données précises et détaillées sur l'émission de bruit, nécessitant de ce fait de séparer les différentes sources de bruit d'un véhicule afin d'en simuler le comportement dans de nombreuses conditions de fonctionnement.

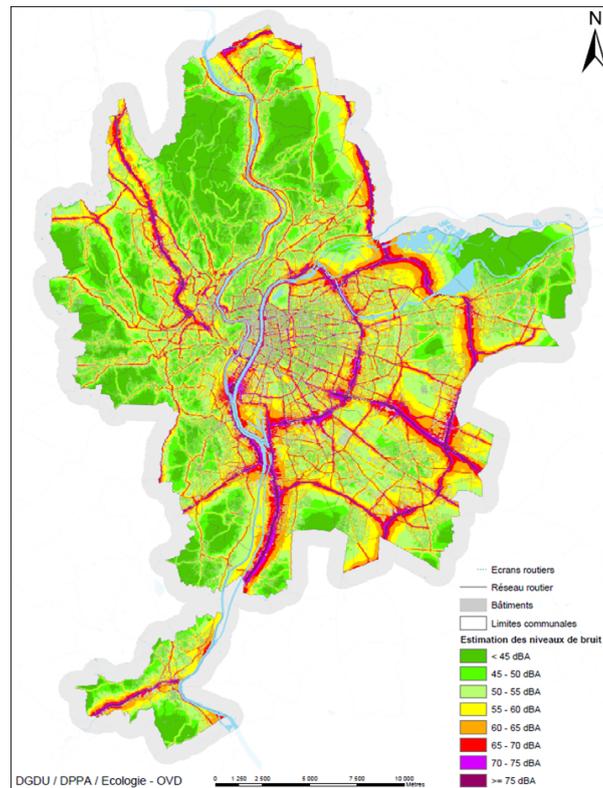


FIGURE 1 – Cartographie du bruit routier du Grand Lyon [Lyon 2011].

La modélisation de l’émission sonore des véhicules est donc un élément fondamental de ces méthodes de prévision pour décrire le bruit à la source, avant même de prendre en compte la complexité de la propagation jusqu’au récepteur. Elle nécessite une connaissance précise des véhicules et de leur comportement acoustique en situation réelle. Même si les véhicules à motorisation thermique classique constituent encore la plus grande part du parc roulant actuel, d’autres technologies de propulsion effectuent des percées significatives, notamment les propulsions électriques ou hybrides. Cependant, les connaissances relatives à l’impact environnemental de leurs différentes sources sonores dans des conditions de fonctionnement diverses sont encore insuffisantes.

Des approches d’identification de sources, s’appuyant sur des méthodes d’imagerie acoustique, ont été développées et sont mises en œuvre au passage de véhicules. Elles consistent le plus souvent à effectuer une séparation géométrique des sources. Il est néanmoins nécessaire de développer de nouvelles approches dans le cas où les sources sont géométriquement confondues et trop proches au regard des performances des précédentes méthodes. C’est à ce type de problématiques que se propose de répondre la présente thèse.

Des travaux ont été menés à l’IFSTTAR sur le gain acoustique obtenu grâce à une motorisation hybride sur un poids-lourd [Pallas et al. 2014a]. Cette étude donne une première expérience d’identification de sources de bruit sur un autre type de motorisation que les moteurs thermiques classiques. Le cas des véhicules légers équipés de nouvelles motorisations (électrique et hybride) a aussi été étudié dans le cadre du projet FOREVER qui cherche à déterminer l’impact sonore

des véhicules électriques et hybrides et propose de compléter le modèle de prévision européen CNOSSOS-EU en conséquence [Pallas et al. 2014b;c]. Toutefois, cette étude a mis en lumière des incertitudes de ce modèle dues aux faiblesses de la séparation des bruits de propulsion et de roulement, ce qui rend nécessaires des approches complémentaires de séparation de sources.

Objectifs de la thèse

L'objectif de cette thèse est de proposer une solution au problème de l'identification de sources mobiles dans le contexte de véhicules routiers, soit en améliorant des méthodes déjà existantes, soit en proposant une nouvelle approche. Un travail approfondi de bibliographie est donc indispensable pour situer l'étude et sélectionner des méthodes prometteuses.

Les méthodes retenues doivent offrir une localisation et une quantification précises des sources de bruit d'un véhicule routier mobile, dans des conditions réelles de passage. Cela signifie que leurs performances doivent être suffisantes pour couvrir une gamme étendue de points de fonctionnement du véhicule, notamment en termes de vitesse de déplacement. De plus, les résultats doivent être valables quel que soit le type de véhicule (véhicule léger, poids lourd, etc.), de motorisation (thermique, hybride ou électrique) et de revêtement de la chaussée (réfléchissant, poreux, etc.).

Enfin, il est primordial que ces méthodes soient caractérisées, c'est-à-dire que leurs limites soient clairement identifiées, afin de déterminer le degré de confiance que l'on peut attribuer à un résultat. Cela peut se faire par une étude de leurs performances en les appliquant à des cas de simulations numériques puis d'expérimentation, avec une complexité croissante allant de cas simples et maîtrisés jusqu'à l'expérience sur un véhicule réel.

Organisation du document

Un état de l'art couvrant différents thèmes sera présenté dans le premier chapitre de cette thèse. Tout d'abord, nous aborderons brièvement les connaissances actuelles sur les sources de bruit d'un véhicule, leurs mécanismes de génération ainsi que certaines de leurs caractéristiques acoustiques, afin d'aider le cas échéant à l'interprétation de résultats d'imagerie. Dans un deuxième temps, nous passerons en revue des méthodes d'imagerie avec un regard critique vis-à-vis du contexte routier et des exigences d'identification, et nous nous dirigerons vers une sélection d'approches candidates pouvant servir de support à notre problématique. Enfin, nous présenterons des notions de traitement du signal basées sur la cohérence, pertinentes pour séparer des sources décorréées et estimer des contributions, et qui peuvent être couplées à des méthodes d'imagerie acoustique.

Le deuxième chapitre sera dédié à la méthode originale développée au cours de cette thèse : CLEAN-T. Une première partie introduira les éléments théoriques de la méthode, ainsi que les justifications du choix de cette approche au regard des spécificités du contexte routier sur lequel porte la thèse. Puis, dans un deuxième temps, une étude numérique comparative présentera le résultat de simulations numériques pour le test des performances de CLEAN-T et d'une autre méthode déjà présente dans la littérature et que nous adapterons à notre cas. Cette étude soulignera des tendances et les limites éventuelles de ces deux méthodes, leurs performances et

robustesse, pour une source mobile.

Le troisième chapitre quant à lui concernera une application expérimentale des méthodes, dans un environnement contrôlé en laboratoire. Le montage expérimental et les résultats obtenus seront présentés et comparés, et constitueront une première analyse de l'applicabilité des approches retenues dans un cas concret maîtrisé.

Enfin, une expérimentation en grandeur réelle de mesure et d'analyse de l'émission sonore et des sources de bruit d'un véhicule léger sera présentée dans le quatrième chapitre. Cette expérience a mis en œuvre conjointement une antenne microphonique en bord de chaussée et des capteurs embarqués dans le véhicule. Tous les éléments importants de sa réalisation seront décrits avant l'examen d'une sélection de passages. Ils permettront d'évaluer les performances des méthodes dans des conditions de passage réelles.

Une synthèse de ce travail de thèse ainsi que des recommandations sur une procédure d'utilisation de CLEANTE sera proposée, puis des perspectives d'amélioration et de travaux futurs clôtureront ce document.

Revue bibliographique - État de l'art

Dans ce chapitre sont présentées une description des sources de bruit d'un véhicule ainsi que les connaissances actuelles en matière de méthodes d'imagerie acoustique permettant de les identifier. La première partie propose une brève revue concernant l'émission de bruit par un véhicule en fonctionnement, offrant un aperçu des sources principales et de leurs caractéristiques. La suite du chapitre se concentre sur l'imagerie acoustique, faisant tout d'abord une revue introductive du large spectre des méthodes existantes avant de se focaliser sur celles qui paraissent les plus pertinentes dans le cadre de la présente étude.

Sommaire

1.1 Sources de bruit d'un véhicule	6
1.1.1 Groupe moto-propulseur	7
1.1.1.1 Excitations primaires	7
1.1.1.2 Sources secondaires	8
1.1.1.3 Spectre du bruit de moteur	9
1.1.2 Bruit de roulement	10
1.2 Méthodes d'imagerie acoustique	12
1.2.1 Introduction	12
1.2.2 Formation de voies et déconvolution – cas de sources statiques	15
1.2.2.1 Formulation temporelle de la formation de voies	16
1.2.2.2 Formulation fréquentielle de la formation de voies	18
1.2.2.3 Performances fréquentielles de l'antenne	20
1.2.2.4 Géométries d'antenne	23
1.2.2.5 Formation de voies : formulation temporelle ou fréquentielle?	25
1.2.2.6 Déconvolution de sources statiques	25
1.2.3 Formation de voies et déconvolution – cas des sources mobiles	33
1.2.3.1 Formation de voies avec suivi de source	34
1.2.3.2 Déconvolution de sources mobiles – Adaptation de la PSF	39
1.2.3.3 Méthodes par découpage temporel du mouvement et MSA-PSF	40
1.3 Séparation de sources	48
1.3.1 Fonction de cohérence et filtrage de signaux	48
1.3.1.1 Cas d'un système à entrée unique et sortie unique	49
1.3.1.2 Cas d'un système à entrées multiples et sortie unique	50
1.3.2 Application pour la séparation de sources acoustiques	53
1.3.2.1 Analyse spectrale conditionnée et analyse spectrale en composantes principales	53
1.3.2.2 Autres approches de référencement	56

1.1 Sources de bruit d'un véhicule

Le bruit généré par un véhicule puis propagé dans l'environnement est la résultante de plusieurs sources distinctes. Différentes études répertorient les principales sources de bruit d'un véhicule impactant son environnement extérieur. Braun et al. proposent par exemple une revue de celles-ci dans le cadre d'une mesure au passage [Braun et al. 2013], de même que Ibarra Zárate [Ibarra Zárate 2013]. Une étude des mécanismes de génération du bruit du véhicule, ainsi que de sa transmission et perception dans l'habitacle a également été réalisée par Zhekova [Zhekova 2007]. Pour un véhicule léger, on peut distinguer deux catégories principales :

1. Le bruit émis par le groupe moto-propulseur (GMP) ;
2. Le bruit de roulement, produit par le contact entre les pneumatiques et la chaussée.

À ces catégories, on peut ajouter le bruit aérodynamique d'écoulement d'air autour du véhicule. Celui-ci, bien qu'il soit prépondérant lorsqu'on considère le bruit intérieur, a une contribution négligeable au bruit extérieur total produit aux vitesses de passages typiques d'un véhicule [Harrison 2004, Wang 2010]. Dans chacune des catégories listées plus haut, il est possible de distinguer plus précisément des sous-catégories comme le bruit de transmission par exemple pour le bruit issu du GMP, ou encore le bruit rayonné par différents éléments du système d'échappement. L'importance relative de ces sources dépend à la fois du type de véhicule considéré (modèle, état d'entretien), ainsi que des conditions d'utilisation (vitesse, allure, choix du rapport de boîte). Ainsi, le bruit de roulement prédomine dans la majorité des cas à hautes vitesses, tandis que le bruit émis par le GMP est dominant lors des phases d'accélération ou à fort régime moteur (fig. 1.1).

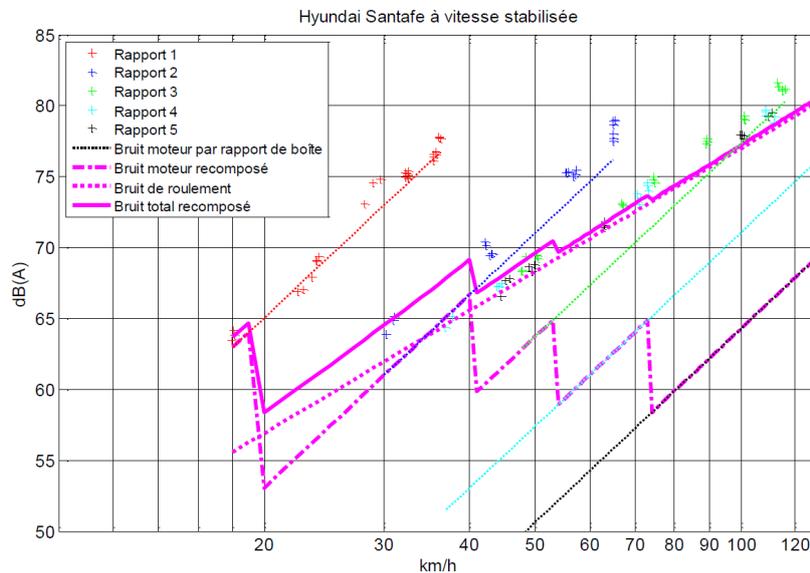


FIGURE 1.1 – Contributions du bruit de propulsion à différents rapports de boîte et du bruit de roulement, pour un véhicule au passage. L_{Amax} à 7,50 m. [Chatagnon et Pallas 2014]

Cette thèse n'ayant pas pour ambition première de caractériser spécifiquement l'une ou plusieurs de ces sources individuelles, mais de les identifier et de les différencier par imagerie

acoustique dans un contexte particulier, décrivons brièvement dans ce qui suit quelques une de leurs caractéristiques.

1.1.1 Groupe moto-propulseur

Le groupe motopropulseur est l'ensemble des éléments d'un véhicule qui participent à sa motricité. Il est constitué du carter cylindre, de la culasse et du couvre culasse, du carter d'huile et de la boîte de vitesses. Leclère et al. proposent une revue des aspects vibro-acoustiques des moteurs thermiques séparés en différents éléments à la fois de génération de bruit et de rayonnement, dont certaines informations essentielles sont synthétisées ci-après [Leclère et al. 2006]. Le bruit global émis par le GMP est large bande et complexe, car il est composé de plusieurs sources corrélées, dont les émissions se recouvrent spectralement. Parmi ces sources de bruit, on peut distinguer celles qui sont liées à des excitations primaires, et d'autres secondaires.

Avant de décrire ces sources, il est nécessaire de rappeler rapidement le principe de fonctionnement d'un moteur. Considérons le cas du moteur à quatre temps : ces quatre temps sont les différentes étapes successives qui forment un cycle complet du moteur. Ces étapes sont l'admission, la compression, la combustion puis l'échappement. Dans chaque cylindre du moteur, un cycle débute avec l'admission d'un mélange d'air (via une soupape) et de carburant (via l'injecteur), le piston descendant dans le cylindre lors de cette étape. Puis le piston remonte afin de comprimer le mélange et le préparer à la phase de combustion, que celle-ci ait une origine extérieure (via une bougie pour les moteurs essence) ou qu'elle se déclenche spontanément (moteurs Diesel). Le piston descend lors de la phase de combustion, puis remonte afin d'expulser les gaz (via une soupape) lors de la phase d'échappement.

Le mouvement de translation du piston est converti en rotation du vilebrequin via la bielle, et le vilebrequin entraîne à son tour le volant moteur permettant la propulsion du véhicule. Puisque dans un cycle moteur, le piston réalise deux mouvements de montée/descente, le vilebrequin fait deux tours par cycle moteur. Le nombre de cylindres peut varier d'un moteur à l'autre, et les cycles de chaque cylindre sont décalés les uns par rapport aux autres. De plus, les explosions dans les cylindres introduisent une part d'aléatoire dans les vibrations engendrées, ce qui distingue le bruit émis d'un cylindre à l'autre. Par conséquent, le bruit global est large bande et d'autant plus riche en fréquences que le nombre de cylindres est grand [Zhekova 2007].

1.1.1.1 Excitations primaires

Trois types d'excitations primaires interviennent dans la génération du bruit du GMP :

- Les forces d'explosion, composante importante pilotée par la combustion du mélange air-carburant dans les cylindres.
- Les forces d'inertie, qui concernent l'attelage mobile, c'est-à-dire les éléments en mouvement du moteur (piston, bielle, vilebrequin).
- Les pressions pulsées, qui sont dues au mouvement des soupapes d'admission et d'échappement.

Le mouvement du piston et sa conversion en couple au niveau du vilebrequin par un mouvement de rotation génèrent des vibrations de la structure globale du moteur selon six degrés de liberté (selon les trois axes de l'espace, en translation et en rotation). Ces vibrations sont propa-

gées à la structure même de la voiture par les points d'attache du moteur, puis sont rayonnées par cette structure.

Forces d'explosions L'explosion des gaz conduit à une brusque augmentation de la pression dans le cylindre, créant un effort assimilable à une force d'impact sur la paroi [Leclère et al. 2006]. On peut écrire analytiquement la force d'explosion exercée sur la paroi du cylindre : sa décomposition en série de Fourier permet de mettre en évidence un terme vibratoire correspondant à la fréquence d'explosion dans un cylindre [Zhekova 2007]. De plus, le contenu spectral du bruit généré dépend également de la vitesse d'augmentation de pression dans le cylindre : plus elle est élevée (resp. faible), et plus le spectre est riche en hautes (resp. basses) fréquences [Leclère et al. 2006].

Forces d'inertie La masse des parties mobiles (bielles, vilebrequin) mises en mouvement lors de l'explosion (1^{er} temps du cycle) entraîne le piston lors des trois autres temps du cycle moteur. La résistance du piston à ce mouvement engendre des forces d'inertie qui génèrent des vibrations en basses fréquences [Leclère et al. 2006, Zhekova 2007]. L'expression analytique de ces forces permet de dégager les propriétés des harmoniques présentes dans le spectre de bruit du moteur, ainsi que de sa fondamentale.

Pressions pulsées Ce type d'excitations est lié à l'admission et à l'échappement des gaz. Ces pressions pulsées trouvent leur origine dans les ouvertures et fermetures successives des soupapes, générant une onde de choc qui se propage le long des circuits d'admission et d'échappement [Braun et al. 2013]. Les différents éléments de ces circuits sont alors mis en vibration, le contenu spectral du bruit rayonné dépendant de leur conception.

1.1.1.2 Sources secondaires

Ces sources sont dites secondaires car elles découlent des excitations primaires qui représentent l'origine première des bruits du GMP. Les principales sources secondaires sont le circuit de distribution, l'injection, l'admission, l'échappement et la transmission [Zhekova 2007].

- **Distribution** : le circuit de distribution contrôle le mouvement des soupapes d'admission et d'échappement via un arbre à cames. Des chocs se produisent lors de leur ouverture et fermeture, et par conséquent des vibrations qui sont rayonnées par la culasse du moteur.
- **Injection** : l'injection sous pression du carburant provoque un choc sur les parois du cylindre. De plus, elle est liée à la combustion et peut jouer sur cette source primaire selon le type d'injection (directe, indirecte, "common-rail", etc.)
- **Admission** : l'aspiration de l'air extérieur génère des ondes acoustiques propagées et rayonnées à différents endroits du système, depuis l'admission générale jusqu'au soupapes, en passant par le filtre, le répartiteur, etc.
- **Échappement** : le bruit d'échappement était dominant au début de l'automobile, mais a été drastiquement réduit par l'utilisation systématique de silencieux d'échappement. L'expulsion de l'air génère des ondes dans le circuit entier, depuis les soupapes jusqu'au pot, en passant par le collecteur, le catalyseur et le silencieux. Des turbulences du flux d'air dans les conduits génèrent également du bruit [Braun et al. 2013].

— **Transmission** : elle désigne l'ensemble des pièces de type courroies ou poulies qui coordonnent les parties rotatives du moteur. Elle génère des bruits en hautes fréquences.

On peut enfin citer une source qui n'entre pas dans le système de génération du bruit décrit par les excitations primaires et secondaires : le bruit de boîte de vitesse. Celui-ci provient de l'engrenage des dents, et est principalement situé à moyennes et hautes fréquences sous forme de sons purs [Zhekova 2007].

1.1.1.3 Spectre du bruit de moteur

Il est intéressant d'étudier l'allure que peut prendre le spectre du bruit de moteur dans le but de l'interpréter correctement. Un exemple tiré de [Zhekova 2007] va nous permettre de dégager quelques propriétés qui pourront s'avérer utiles lors de mesures sur un véhicule (fig. 1.2).

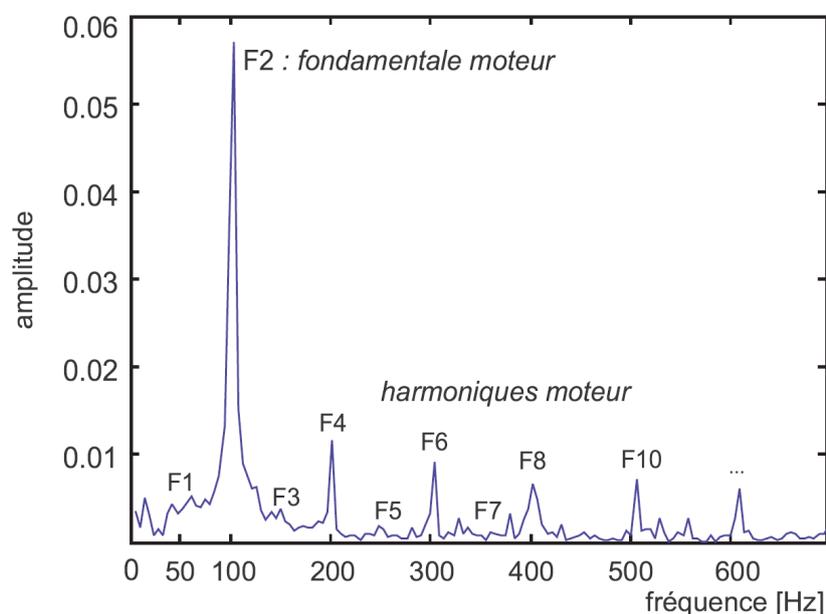


FIGURE 1.2 – Spectre de bruit de moteur à 3000 tr.min⁻¹. [Zhekova 2007]

Comme expliqué précédemment dans le fonctionnement d'un moteur à quatre temps, on peut distinguer deux cycles principaux : le cycle moteur global, correspondant à deux tours de vilebrequin, et durant lequel toutes les explosions des cylindres ont lieu, et le cycle des explosions elles-mêmes. On peut ainsi définir une fréquence globale du moteur, ainsi qu'une fréquence d'explosion (celle-ci dépend du nombre de cylindres) en fonction du régime moteur : pour un régime moteur de 3000 tr.min⁻¹, la fréquence globale vaut 25 Hz et la fréquence d'explosion vaut 100 Hz pour un moteur à quatre cylindres. Par convention, on note F0.5 la fréquence correspondant à un cycle complet du moteur, donc à deux tours du vilebrequin, et F1 la fréquence correspondant à un seul tour [Zhekova 2007].

Le spectre du bruit de moteur est typiquement un spectre de raies, dont on peut définir une fréquence fondamentale moteur à laquelle se trouve la composante principale du spectre. Cette fréquence fondamentale dépend du nombre de cylindres du moteur : elle correspond à la

fréquence d'explosion, et elle vaut $F2$ (resp. $F3$) dans le cas d'un moteur à quatre (resp. six) cylindres, car une explosion se produit tous les $1/2$ (resp. $1/3$) de tours de vilebrequin. On constate ainsi que l'exemple de la figure 1.2 représente un moteur à quatre cylindres. De plus, on remarque que seules les harmoniques paires de la fondamentale moteur sont présentes : ce phénomène peut être mis en évidence à l'aide de l'expression analytique des forces d'inertie.

1.1.2 Bruit de roulement

L'interaction entre le pneumatique et la surface de la chaussée est complexe. De nombreuses études se sont intéressées aux mécanismes de génération et de propagation du bruit issu de cette interaction. Dans leur ouvrage de référence, Sandberg et Ejsmont ont passé en revue de manière exhaustive les connaissances concernant ces phénomènes particuliers [Sandberg et Ejsmont 2002]. Des précisions et une connaissance plus approfondie de ces mécanismes ont fait l'objet d'études ultérieures, comme par exemple les thèses de Conte [Conte 2008] et Dubois [Dubois 2012]. Nous nous contenterons ici d'indiquer les principaux mécanismes recensés à ce sujet sans rentrer dans le détail technique que l'on pourra étudier dans ces références.

Le bruit de roulement est un bruit large bande compris entre 50 et 5000 Hz, avec un maximum du niveau sonore situé entre 700 et 1500 Hz. Iwao et Yamazaki [Iwao 1996] ont localisé quatre zones d'où provient le bruit de roulement, ce qui peut donner une première indication sur les mécanismes de génération du bruit : le passage de roue (55-600 Hz), les flancs (400-600 Hz), le bord avant du pneu ainsi que le bord arrière (500-2000 Hz). Ces mécanismes de génération du bruit sont divisés en trois catégories [Sandberg et Ejsmont 2002, Dubois 2012] : mécanismes d'origine mécanique (<1 kHz), mécanismes aérodynamiques (>1 kHz) et mécanismes d'amplification.

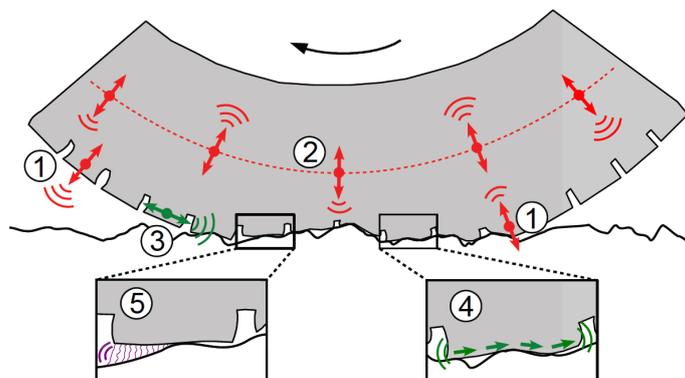


FIGURE 1.3 – Phénomènes d'origine mécanique - (1 et 3) vibrations radiales et tangentielles des pains de gomme, (2) vibrations radiales de la carcasse du pneu, (4) phénomènes de stick/slip, (5) phénomènes de stick/snap. [Dubois 2012]

Les phénomènes d'origine mécanique (fig. 1.3) concernent directement le contact dynamique entre le pneumatique et la chaussée. Deux types de mécanismes sont à l'œuvre : d'une part des impacts qui provoquent des vibrations radiales (300-1000 Hz) du pneumatique qui se propagent sur tout ou partie de celui-ci en fonction du domaine de fréquence, et d'autre part des phénomènes d'adhérence et glissement ("stick/slip", "stick/snap"), qui provoquent des vibrations

tangentielles [Anfosso-Lédée et Cesbron 2013]. Les vibrations d'ensemble du pneumatique et des pains de gomme sont ensuite transmises à l'air environnant par rayonnement acoustique. Elles sont générées par les successions d'impacts au moment du contact entre les pains de gomme du pneumatique et la rugosité (texture) de la chaussée, et de relâchements à la fin de celui-ci, ainsi qu'aux déformations du pneumatique lui-même. Le phénomène de "stick/slip" se produit quant à lui lorsque les limites d'adhérence des pains de gomme sont dépassées par les forces tangentielles entre pneumatique et chaussée. L'énergie potentielle emmagasinée pendant la phase d'adhérence (ou "stick") se dissipe en partie par frottement et en partie sous forme de vibrations tangentielles. C'est d'autant plus vrai dans les phases d'accélération et de freinage, moins en roulement à vitesse stabilisée [Anfosso-Lédée et Cesbron 2013].

Les mécanismes aérodynamiques sont principalement des mécanismes dits de "pompage d'air" ("air-pumping") auxquels s'ajoutent des phénomènes de résonance. Le mécanisme générateur correspond à des compressions/détentes rapides de l'air piégé à l'interface pneumatique/chaussée. Peuvent s'ajouter à ces mécanismes excitateurs des résonances de Helmholtz en sortie de zone de contact (point (4) de la figure 1.4) ainsi que des résonances du réseau de rainures du pneumatique (point (3) de la figure 1.4). Le bruit émis par le pompage d'air se situe entre 1 et 3 kHz [Conte 2008].

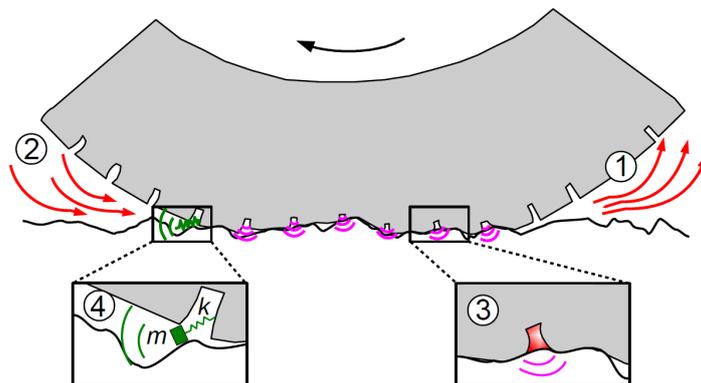


FIGURE 1.4 – Mécanismes aérodynamiques - (1 et 2) pompage d'air, (3) résonance de tuyaux, (4) résonateurs de Helmholtz. [Dubois 2012]

Enfin deux mécanismes principaux sont identifiés pour amplifier le bruit généré par les phénomènes mécaniques et aérodynamiques précédents [Dubois 2012] : l'effet dièdre et la résonance acoustique du pneumatique (fig. 1.5). L'effet dièdre est dû à la géométrie de la roue par rapport à la route qui est similaire au pavillon d'un cor et qui amplifie donc les sources générées au niveau des bords d'attaque et de fuite. De multiples réflexions acoustiques se produisent entre la surface du pneumatique et celle de la chaussée, l'effet restant faible en basses fréquences, maximum autour de 1 à 2 kHz et à nouveau réduit en hautes fréquences [Sandberg et Ejsmont 2002]. La résonance acoustique est quant à elle causée par les déformations du pneu en roulement, l'air contenu à l'intérieur entrant alors en résonance acoustique. Cela ajoute un bruit basses fréquences (autour de 220 Hz pour un véhicule léger) [Anfosso-Lédée et Cesbron 2013].

Divers paramètres influent sur le bruit de roulement, notamment les caractéristiques du revêtement routier : la structure de la chaussée conditionne non seulement les mécanismes d'im-

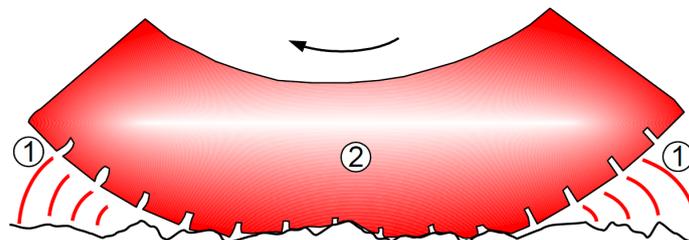


FIGURE 1.5 – Mécanismes d'amplification - (1) effet dièdre, (2) résonance acoustique du pneumatique. [Dubois 2012]

pact avec le pneu, mais joue également sur le bruit propagé par son absorption plus ou moins importante. Par ailleurs, les paramètres de conduite (principalement la vitesse), les conditions météorologiques ou encore les paramètres pneumatiques (géométrie, équilibrage, irrégularités de forme, sculpture de la bande de roulement, etc.) ont aussi une influence sur ce bruit.

1.2 Méthodes d'imagerie acoustique

1.2.1 Introduction

L'imagerie acoustique regroupe un grand nombre de méthodes basées sur la mesure acoustique et sur le traitement du signal, ayant pour but de créer une image d'un objet d'étude permettant d'identifier les sources de bruit provenant de cet objet. Le problème d'identification consiste à localiser ainsi qu'à quantifier de telles sources, soit dans le but d'accroître la connaissance sur leur comportement, soit dans celui d'en réduire les nuisances.

Il existe différentes familles de méthodes d'imagerie acoustique pour traiter la variété de contextes et situations étudiées : sources statiques ou en mouvement, mouvement linéaire ou rotatif, vitesse de passage faible ou élevée, champ proche ou champ lointain, etc. Dans la plupart des cas, on utilise une antenne de microphones pour réaliser les mesures, dont la géométrie varie également en fonction du problème traité. Dans le cas du bruit au passage de véhicules routiers, nous sommes confrontés à des signaux non-stationnaires à la fois spatialement (puisque le véhicule se déplace) et temporellement (signaux reçus transitoires, effet Doppler). Comme nous le verrons plus bas, certaines méthodes reposent sur une hypothèse d'invariance du transfert entre la source et le récepteur, ce qui ne convient pas pour des sources en mouvement. De plus, certaines requièrent des temps de mesure relativement longs qui ne sont pas non plus envisageables dans notre étude. En effet, un véhicule passe à une distance typiquement de l'ordre de quelques mètres devant un système de mesure, par conséquent on ne dispose que de quelques dixièmes de secondes de signal utile en fonction de la vitesse de passage.

Initialement, la première technique d'imagerie acoustique était le sonar, utilisé en acoustique sous-marine au début du XX^e siècle. Beaucoup plus tard, des méthodes d'imagerie développées dans d'autres domaines de la physique ont été adaptées à cette dernière, comme par exemple l'holographie optique qui a conduit à l'holographie acoustique de champ proche [Williams et al. 1980], plus tard étendue à des surfaces quelconques [Veronesi et Maynard 1989]. Toutes les méthodes existantes ne sont cependant pas adaptées au contexte qui nous intéresse, celui du

bruit au passage de véhicules routiers. Elles répondent généralement à des contraintes spécifiques correspondant à un contexte en particulier. Par exemple, la méthode holographique répandue NAH (pour Near-field Acoustic Holography) consiste à mesurer le champ acoustique sur un plan, appelé "hologramme", à partir duquel on peut soit calculer un plan "propagé", soit remonter au plan des sources. On y parvient par le biais de propagateurs spatiaux pour obtenir les champs de pression, vitesse acoustique et intensité acoustique, soit dans le sens direct pour prédire le champ acoustique sur un plan plus éloigné des sources, soit dans le sens inverse pour déterminer le plan source. La résolution de cette méthode est améliorée par rapport à l'imagerie conventionnelle (formation de voies, voir plus bas) par la prise en compte des ondes évanescentes. Cependant, il est pour cela nécessaire d'effectuer la mesure en champ proche (d'où son nom d'holographie de champ proche), avec une distance plan source/plan hologramme de l'ordre d'une demi-longueur d'onde [Parisot-Dupuis 2012].

Parmi le spectre des méthodes existantes, la formation de voies (FV) est à ce jour celle qui est la plus naturelle pour traiter du bruit au passage de véhicules [Michel 2006] – que ceux-ci soient routiers [Kook et al. 2000, Michel et al. 2004, Pallas et al. 2013, Ballesteros et al. 2015], aériens [Mueller 2002, Sijtsma et Stoker 2004, Brusniak et al. 2006], ferroviaires [Barsikow 1996, Pallas 2002, Pallas et al. 2011, Le Courtois et al. 2016] ou encore maritimes [de Jong et al. 2009, Oudompheng 2015]. Il s'agit de mettre en phase des signaux reçus par une antenne de capteurs puis de les sommer afin de maximiser le signal provenant d'une direction ou d'un point de l'espace, tout en atténuant tout signal provenant d'une autre direction. On réalise ainsi un filtre spatial ayant une forme de sinus cardinal, avec un lobe principal d'amplitude unitaire dans la direction d'écoute et plusieurs lobes secondaires d'amplitudes moindres, et décroissives. Pour ce faire, on peut calculer la matrice interspectrale des signaux microphoniques et utiliser des fonctions de type fonction de Green pour modéliser la propagation des ondes et mettre en phase les signaux. Cette méthode permet de construire des cartographies acoustiques d'un véhicule, à une fréquence particulière ou par bande de fréquence. Un exemple est présenté sur la figure 1.6, mettant en évidence le bruit lors d'un passage d'un tramway (antenne en deux dimensions, en croix) [Pallas et al. 2011]. On remarque toutefois que deux sources voisines pourront difficilement être séparées si elles se trouvent trop proches l'une de l'autre, leurs contributions pouvant être confondues. Cette méthode, une référence dans ce contexte, a donc des limites bien connues (et qui sont détaillées dans les sections 1.2.2 et 1.2.3), que tentent de surmonter d'autres techniques de traitement du signal.

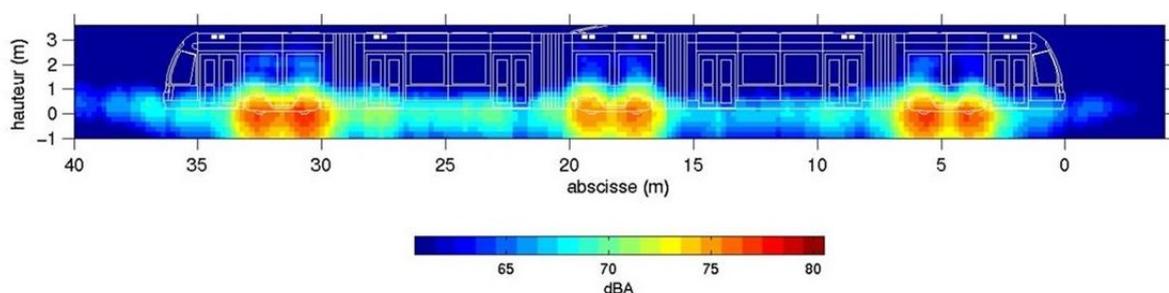


FIGURE 1.6 – Exemple de cartographie acoustique d'un tramway - Vitesse : 30km/h - Niveau global. [Pallas et al. 2011]

Différentes stratégies de pondération des fonctions de Green, extensions de la formation de voies et permettant d'augmenter de manière significative sa résolution spatiale, sont avant tout adaptées aux sources statiques. C'est le cas des méthodes Capon [Capon 1969] et Music [Bienvenu et Kopp 1983] par exemple. Certains auteurs proposent de retirer la diagonale de la matrice interspectrale des microphones afin de supprimer la contribution du bruit de mesure [Dougherty 2002], cette même approche étant plus tard adaptée au domaine temporel [Dougherty 2004, Kern et Opfer 2006]. Cependant, la matrice interspectrale ainsi modifiée n'est plus définie positive, introduisant le risque d'obtenir des solutions négatives pour la puissance des sources, résultat physiquement non valide. Un autre développement à partir de la formation de voies, proposé par Dougherty [Dougherty 2014] et appliqué par la suite au bruit au passage d'un avion par Merino-Martinez [Merino-Martinez et al. 2016], est la formation de voies dite "fonctionnelle". Elle consiste à élever la matrice interspectrale à la puissance inverse d'un entier p avant de normaliser la sortie de formation de voies en la mettant à la puissance p . Ce faisant, on accentue l'atténuation des sources provenant d'une direction différente de la direction d'écoute en élevant à la puissance p l'amplitude des lobes secondaires, dont l'amplitude est initialement inférieure à l'unité. Bien que cela permette une amélioration de la dynamique de la formation de voies, et ainsi de mettre en évidence des sources de niveaux plus faibles pouvant être masquées par des sources plus importantes dans la formation de voies conventionnelle, il n'est pas possible d'obtenir une estimation correcte de l'amplitude des sources par cette approche [Baron et al. 2018].

Là où des méthodes telles que la formation de voies et ses développements réalisent l'identification source par source, certaines approches tentent de résoudre le problème inverse d'identification de manière globale. Celui-ci étant souvent mal posé, le nombre de sources potentielles dépassant en pratique le nombre de microphones utilisés, des stratégies de régularisation ont été introduites dans ce contexte d'imagerie acoustique, en minimisant à la fois l'erreur quadratique d'estimation de la puissance des sources ainsi que la norme de la puissance des sources elle-même (par exemple la régularisation de Tikhonov qui minimise la trace de la matrice d'autospectres des sources estimées [Tikhonov et Arsenine 1976]). L'ajout d'information *a priori* sur la source a également été testé, notamment le principe de parcimonie : en plus de minimiser l'erreur quadratique de la formulation inverse, on suppose que la distribution des sources est composée de seulement quelques composantes non nulles dans une base donnée, qui dépend de la nature des sources choisies pour construire le modèle de propagation. On peut imposer la parcimonie en minimisant la norme p de la diagonale de la matrice interspectrale des sources estimées en choisissant p entre 1 (forte parcimonie) et 2 (pas de parcimonie) [Leclere et al. 2016]. Des méthodes itératives apportant cette parcimonie sont également envisageables, et parmi elles, la famille des approches heuristiques dites de "Matching pursuit" (CLEAN [Högbohm 1974], Relax [Li et al. 1997, Wang et al. 2003]) donne une solution approximative au problème de minimisation à la fois de l'erreur quadratique et de la norme L0 de la solution – cette minimisation impliquant la parcimonie la plus forte possible. D'autres approches apportent la solution exacte au même problème mais avec la norme L1 (BPDN [Gill et al. 2011], LASSO [Tibshirani 1996]) [Leclere et al. 2016].

Les méthodes de déconvolution quant à elles cherchent à supprimer l'influence de la réponse d'antenne dans la production de la carte acoustique par la formation de voies. La résolution du problème inverse peut alors se faire par le biais de différents algorithmes, comme les moindres

carrés non-négatifs (NNLS [Lawson et Hanson 1995]) ou encore en étant basée sur un algorithme de Gauss-Seidel dans le cas de DAMAS [Brooks et Humphreys 2004]. La plupart de ces méthodes sont cependant pensées pour des cas statiques, et leur application au cas de sources mobiles demeure problématique, comme nous le verrons plus loin dans la section 1.2.3.2.

Blacodon et Élias [Blacodon et Elias 2003] proposent quant à eux une autre approche, "Spectral Estimation Method" ou SEM, qui consiste non pas à déterminer les sources qui minimisent l'écart entre une cartographie de formation de voies modélisée et celle obtenue par la mesure, mais celles qui permettent d'estimer au mieux la matrice interspectrale des signaux de microphones mesurés. Leur méthode repose ainsi sur la modélisation de la matrice interspectrale des microphones, qui est générée pour chaque position de source possible en utilisant un modèle de propagation, et fait l'hypothèse d'une directivité uniforme des sources. Cette méthode est étendue par l'introduction de la directivité des sources dans le calcul de la matrice interspectrale modélisée dans [Michel et Funke 2008]. Cependant, comme pour d'autres méthodes mentionnées plus haut, l'estimation de la matrice interspectrale est difficile dans le cas de sources en mouvement. Les approches nécessitant cette estimation sont donc *a priori* peu adaptées au bruit au passage.

Enfin, on peut citer les approches par fonctions de transferts acoustiques TPA et OTPA (Transfer Path Analysis et Operational TPA) qui cherchent à évaluer les contributions de sources, car elles ont été appliquées dans le cadre de l'automobile. Il ne s'agit néanmoins pas de méthodes d'imagerie acoustique à proprement parler. Le principe consiste à mesurer les fonctions de transfert entre des points source potentiels et des capteurs de proximité (appelés "indicateurs") d'une part, et entre ces points source et des capteurs éloignés d'autre part (généralement à 7,50 m). Les premières matrices de transfert permettent de remonter aux signaux individuels des points source lors de la mise en fonctionnement du véhicule, tandis que les secondes permettent de calculer leur contribution au niveau des capteurs lointains grâce à ce premier calcul. Cette méthode est généralement appliquée en chambre semi-anéchoïque et de manière statique, le véhicule étant placé sur un banc à rouleaux. Le mouvement du véhicule peut être calculé à l'aide des capteurs lointains par synthèse prédictive, mais il ne s'agit pas d'un mouvement réel [Schuhmacher et al. 2012], ce qui rend ces approches incompatibles avec les objectifs de cette thèse. D'autres cas d'application plus courants de ces approches concernent l'étude de structures vibrantes — donc statiques — comme par exemple dans [Roozen et Leclère 2013] ou [Kim et al. 2017].

1.2.2 Formation de voies et déconvolution – cas de sources statiques

Une antenne microphonique est un réseau de microphones. Ses dimensions et sa géométrie dépendent du contexte de la mesure, en particulier des fréquences considérées, des distances impliquées ainsi que de la taille des objets/véhicules étudiés. L'acquisition des signaux de tous les microphones doit être réalisée de façon synchrone. La formation de voies consiste à combiner les signaux reçus par les différents microphones pour créer des interférences constructives ou destructives, et ainsi privilégier une direction d'écoute.

Le principe de cette méthode et ses développements seront présentés par la suite dans le cas d'une antenne linéaire à capteurs équidistants, ce qui permet de simplifier les écritures et équations du problème sans restreindre la généralité.

1.2.2.1 Formulation temporelle de la formation de voies

1.2.2.1.1 Traitement en ondes planes

Une onde reçue par une antenne est considérée comme plane lorsque ses fronts d'onde incidents sont des plans parallèles entre eux sur la longueur de l'antenne. On se trouve dans ce cas lorsque la source est située en champ lointain (ou zone de Fraunhofer) de l'antenne. *Contrairement*, si elle se trouve en champ proche (ou zone de Fresnel), l'onde incidente reçue par l'antenne est sphérique. La limite entre ces deux zones peut être définie en fonction de la distance entre la source et l'antenne, de la longueur de l'antenne et de la longueur d'onde de l'onde incidente [Elias et Malmarmey 1983]. Le critère pour déterminer cette limite est que la différence de marche (correspondant à un déphasage) entre deux capteurs recevant un même front d'onde doit être négligeable devant une fraction de la longueur d'onde (correspondant à une fraction de la période).

Considérons une antenne linéaire composée de N_M microphones espacés de la distance d . L'antenne reçoit l'onde de célérité c avec un angle θ_0 repéré par rapport à la normale à l'axe de l'antenne (figure 1.7).

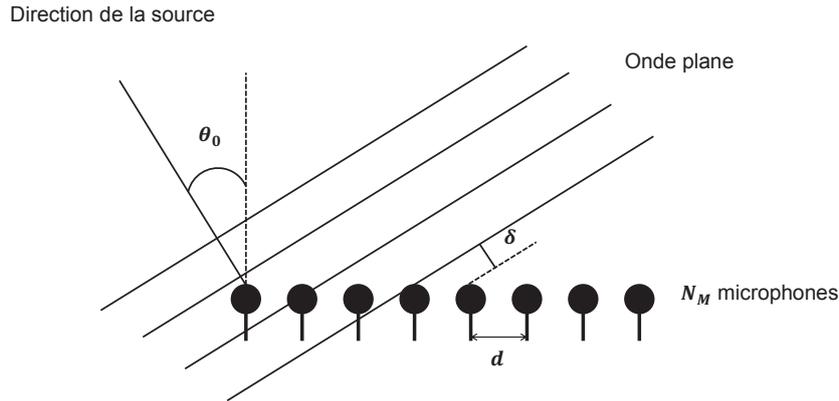


FIGURE 1.7 – Onde plane sous incidence θ_0 .

Soit $s(t)$ le signal émis par la source et $p_m(t)$ la pression acoustique reçue par le microphone m ($m = 0 \dots N_M - 1$). L'onde est captée par les microphones avec un décalage temporel Δt entre ceux-ci, lié à la différence de marche δ :

$$\Delta t = \frac{\delta}{c} = \frac{d \sin \theta_0}{c} \quad \text{et} \quad p_1(t) = p_0 \left(t - \frac{d \sin \theta_0}{c} \right)$$

On en déduit que le signal reçu par le microphone m s'écrit :

$$p_m(t) = p_0(t - m\Delta t) = p_0 \left(t - m \frac{d \sin \theta_0}{c} \right) \quad (1.1)$$

La formation de voies classique consiste à compenser le retard de propagation de chaque capteur par rapport à un point de référence (par exemple le capteur 0) pour une direction d'incidence θ donnée, puis à moyenner les signaux :

$$b(t, \theta) = \frac{1}{N_M} \sum_{m=0}^{N_M-1} p_m \left(t + m \frac{d \sin \theta}{c} \right) \quad (1.2)$$

Soit en substituant (1.1) dans (1.2) :

$$b(t, \theta) = \frac{1}{N_M} \sum_{m=0}^{N_M-1} p_0 \left(t + m \frac{d}{c} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right) \quad (1.3)$$

θ est ici la direction d'écoute de l'antenne. Dans le cas d'un traitement numérique des signaux, la formation de voies présente l'avantage de pouvoir choisir cette direction d'écoute *a posteriori* de la mesure. Si la direction d'écoute choisie coïncide avec la direction de la source θ_0 , la formation de voies donne :

$$b(t, \theta_0) = p_0(t)$$

Dans ce cas précis, l'antenne délivre le même signal que le microphone de référence. En revanche, si θ est différent de la direction d'incidence θ_0 , le signal issu de la source est atténué : l'antenne associée à la formation de voies se comporte comme un filtre passe-bande spatial autour de la direction d'écoute θ (cf. section 1.2.2.3). La méthode permettant de localiser une source consiste alors à balayer l'espace en faisant varier la direction d'écoute θ : la valeur de θ pour laquelle la puissance du signal de sortie est maximale indique la direction de la source.

1.2.2.1.2 Traitement en ondes sphériques

Pour des sources acoustiques, supposées monopolaires, ponctuelles et proches de l'antenne, les fronts d'onde sur celle-ci ne peuvent plus être considérés comme plans. Ils présentent une forme sphérique (fig. 1.8).

Sur le même principe qu'en ondes planes, les retards sont compensés et les signaux moyennés. En revanche, le retard n'est plus incrémental entre capteurs successifs : on réalise alors une focalisation de l'antenne sur un point F de l'espace et non plus dans une direction θ . De plus, par principe de conservation d'énergie sur un même front d'onde, le signal reçu est d'autant plus atténué que le capteur est loin de la source. Il faut par conséquent tenir compte de cette atténuation en plus du retard et inclure une correction d'amplitude.

r_{Sm} est la distance entre la source $S(x_s, y_s)$ et le capteur m . Pour une diffusion sphérique, le signal reçu par le capteur m par référence à un point C (cette référence peut être l'un des capteurs de l'antenne, typiquement le microphone central) a pour expression :

$$p_m(t) = \frac{r_{SC}}{r_{Sm}} p_C \left(t - \frac{r_{Sm} - r_{SC}}{c} \right)$$

Le traitement consistant à focaliser l'antenne au point F revient à compenser les différences de retard de propagation entre capteurs pour une source qui serait au point F , puis de sommer tous les signaux :

$$b(t, F, C) = \frac{1}{N_M} \sum_{m=0}^{N_M-1} \frac{r_{Fm}}{r_{FC}} p_m \left(t + \frac{r_{Fm} - r_{FC}}{c} \right) \quad (1.4)$$

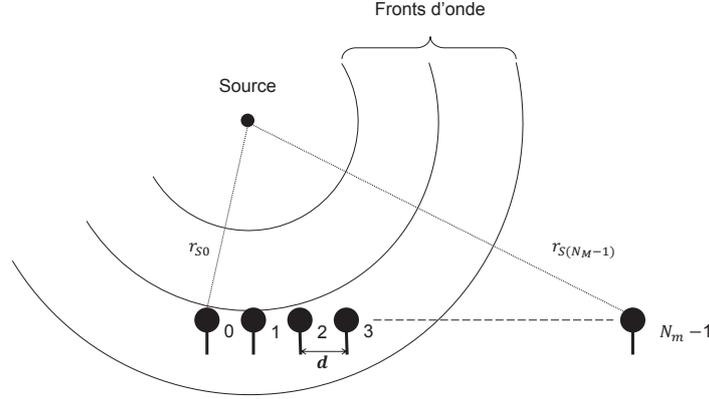


FIGURE 1.8 – Onde sphérique incidente sur l'antenne linéaire

avec

r_{Fm} la distance du point F au capteur m

r_{FC} la distance du point F au point de référence C

$p_m(t)$ le signal reçu par le capteur m

c la célérité du son

Si le point focal est confondu avec la source (i.e. $F = S$), le signal en sortie d'antenne devient $b(t, S, C) = p_C(t)$, et l'antenne donne le même signal qu'un microphone seul qui serait placé au niveau du point de référence C . La procédure pour localiser une source consiste donc, comme dans le cas de l'onde plane, à balayer le point focal dans une région de l'espace : les zones de signal fort en sortie d'antenne indiquent la présence d'une source au niveau du point focal. On peut également utiliser une formulation dite "*optimale*" au sens du maximum de vraisemblance :

$$b(t, F) = \frac{\sum_{m=0}^{N_M-1} \frac{1}{r_{Fm}} p_m \left(t + \frac{r_{Fm}}{c} \right)}{\sum_{m=0}^{N_M-1} \frac{1}{r_{Fm}^2}} \quad (1.5)$$

La démonstration de ce choix de pondération est présentée dans la section 1.2.2.2 avec la formulation fréquentielle de la formation de voies.

1.2.2.2 Formulation fréquentielle de la formation de voies

Nous avons vu dans la section 1.2.2.1 le principe de la formation de voies dans le domaine temporel. Une alternative consiste à considérer le problème dans le domaine fréquentiel, à une fréquence donnée. En effet, pour une source ponctuelle émettant un signal $s(t) = \frac{\dot{q}(t)}{4\pi}$ où $\dot{q}(t)$ est sa variation de débit massique, et un observateur O situé à une distance r de la source S , on a :

$$\hat{p}_O(f) = G(r, f) \hat{s}(f) \quad (1.6)$$

avec $\widehat{p}_O(f)$ la transformée de Fourier à la fréquence f de la pression $p_O(t)$ captée par l'observateur O , $\widehat{s}(f)$ la transformée de Fourier à la fréquence f de $s(t)$, et G définie par :

$$G(r, f) = \frac{e^{-jkr}}{r}, \quad k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} \quad (1.7)$$

Reprenons le cas d'une antenne linéaire de N_M microphones. On peut exprimer la transformée de Fourier du signal reçu par chaque capteur, à la fréquence f :

$$\widehat{p}_m(f) = G(r_{Sm}, f)\widehat{s}(f) = \frac{e^{-jkr_{Sm}}}{r_{Sm}}\widehat{s}(f) \quad (1.8)$$

avec r_{Sm} la distance entre le capteur m et la source S .

De manière analogue au cas temporel, la focalisation de l'antenne sur un point F de l'espace s'écrit :

$$\widehat{b}(f, F) = \mathbf{W}^H(f, F)\widehat{\mathbf{p}}(f) \quad (1.9)$$

où $\widehat{\mathbf{p}}$ est le vecteur contenant l'ensemble des \widehat{p}_m , \mathbf{W} est un vecteur normalisé appelé *vecteur de pointage* et H note la transposée hermitienne (vecteur transposé dont les éléments complexes sont conjugués).

Le choix de \mathbf{W} peut varier selon les cas. On peut par exemple le choisir de manière à minimiser l'écart quadratique $|\mathbf{W}^H\widehat{\mathbf{p}} - \widehat{s}|^2$ entre le modèle et la mesure [Pascal 2009]. Pour alléger les notations, on notera par la suite dans le domaine fréquentiel les variables p et s sans chapeau et la dépendance fréquentielle sera implicite. On note J la fonction de \mathbf{W} à minimiser :

$$J = E\{(\mathbf{W}^H\mathbf{p} - s)(\mathbf{W}^H\mathbf{p} - s)^*\} = \mathbf{W}^H\bar{\mathbf{\Gamma}}\mathbf{W} - \mathbf{W}^HE\{\mathbf{p}s^*\} - E\{s\mathbf{p}^H\}\mathbf{W} + E\{ss^*\} \quad (1.10)$$

où $\bar{\mathbf{\Gamma}} = E\{\mathbf{p}\mathbf{p}^H\}$ est la matrice interspectrale de l'antenne de microphones. On reconnaît l'autospectre $\Gamma_S = E\{ss^*\}$ de la source. Soient les vecteurs de densités interspectrales de puissance $\mathbf{g} = E\{\mathbf{p}s^*\}$ et $\mathbf{g}^H = E\{s\mathbf{p}^H\}$, on peut écrire J de la manière suivante :

$$J = \mathbf{W}^H\bar{\mathbf{\Gamma}}\mathbf{W} - \mathbf{W}^H\mathbf{g} - \mathbf{g}^H\mathbf{W} + \Gamma_S \quad (1.11)$$

La solution optimale est obtenue en calculant son minimum qui vérifie la condition $\frac{\partial J}{\partial \mathbf{W}^H} = 0$, ce qui donne :

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{W}^H} = 2(\bar{\mathbf{\Gamma}}\mathbf{W} - \mathbf{g}) = 0 \quad (1.12)$$

Le vecteur de pointage optimal est donc (sous condition que $\bar{\mathbf{\Gamma}}$ soit inversible) :

$$\mathbf{W}_{\text{optimal}} = \bar{\mathbf{\Gamma}}^{-1}\mathbf{g} \quad (1.13)$$

Or en reprenant l'expression du signal des microphones donnée par (1.6), on peut exprimer $\bar{\mathbf{\Gamma}}$ et \mathbf{g} en fonction de s et \mathbf{G} , vecteur dont les composantes sont les $G(r_{Sm}, f)$ de chaque microphone, définis par (1.7). On obtient alors :

$$\mathbf{W}_{\text{optimal}} = \bar{\mathbf{\Gamma}}^{-1} \mathbf{g} = (\mathbf{G}\mathbf{G}^H)^{-1} \mathbf{G} = \frac{\mathbf{G}}{\mathbf{G}^H \mathbf{G}} = \frac{\mathbf{G}}{\|\mathbf{G}\|^2} \quad (1.14)$$

Classiquement dans le domaine fréquentiel, la formation de voies s'effectue en énergie. On calcule dans un premier temps la matrice interspectrale de l'antenne de microphones puis on calcule le vecteur de pointage traduisant la propagation de l'onde. L'énergie $B(f, F)$ provenant du point F et captée par l'antenne de microphones s'obtient donc par un simple calcul matriciel :

$$B(f, F) = \mathbf{W}^H(f, F) \bar{\mathbf{\Gamma}}(f) \mathbf{W}(f, F) \quad (1.15)$$

1.2.2.3 Performances fréquentielles de l'antenne

L'antenne de microphones utilisée dans la formation de voies est caractérisée par sa réponse en fréquence, que nous étudions dans cette section. Sans perdre en généralité, considérons le cas d'une onde plane monochromatique qui permet d'exprimer analytiquement la réponse du filtre spatial réalisé par la formation de voies. Pour une onde de fréquence f , d'incidence θ_0 , et une antenne orientée dans la direction θ , le module de la réponse $H_{FV}(f, \theta, \theta_0)$ du filtre est donnée par :

$$H_{FV}(f, \theta, \theta_0) = \left| \frac{\sin \left(\pi f N_m \frac{d}{c} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right)}{N_M \sin \left(\pi f \frac{d}{c} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right)} \right| \quad (1.16)$$

Cette réponse a la forme d'un sinus cardinal, avec un lobe principal centré sur l'angle d'incidence θ_0 , et d'une succession de lobes secondaires d'amplitude décroissante (figure 1.9).

La résolution spatiale de l'antenne exprime sa capacité à séparer deux sources proches. La formation de voies étant analogue à un filtre spatial, la résolution peut être mesurée par la largeur à -3 dB du lobe principal [Elias 1990]. D'autres mesures de la résolution sont envisageables, et certaines sont discutées dans [Johnson et Dudgeon 1993]. Une mesure facile à déterminer analytiquement repose sur la largeur de la base du lobe principal et permet de dégager quelques propriétés importantes de l'antenne. D'après l'équation (1.16), la réponse H_{FV} s'annule pour :

$$N_M \frac{d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) = k \quad k \in \mathbb{Z}^* \quad (1.17)$$

La largeur du lobe central L_{lobe} correspondant à l'écart entre les deux premières annulations de part et d'autre de la direction d'écoute, il vient :

$$L_{\text{lobe}} = \left| \arcsin \left(\sin \theta_0 + \frac{\lambda}{N_M d} \right) - \arcsin \left(\sin \theta_0 - \frac{\lambda}{N_M d} \right) \right| \quad (1.18)$$

Dans le cas d'une incidence $\theta_0 = 0$, cette largeur se réduit à :

$$L_{\text{lobe}} = \left| 2 \arcsin \left(\frac{\lambda}{N_M d} \right) \right| \quad (1.19)$$

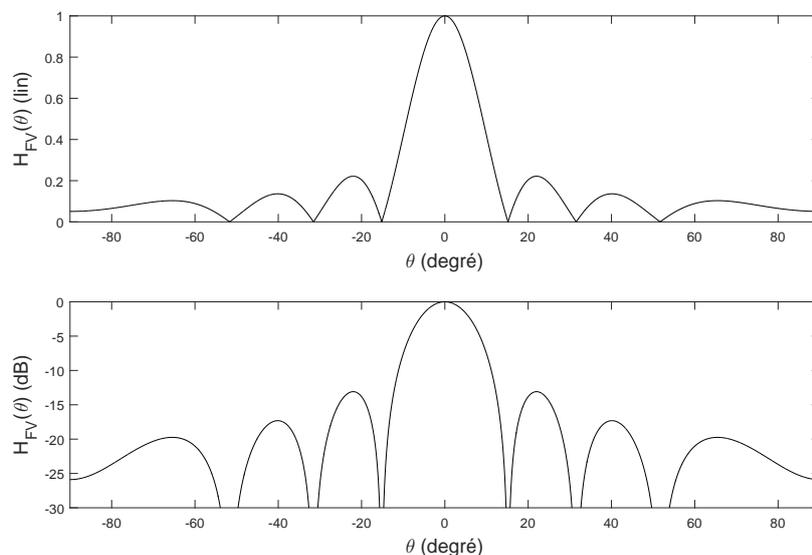


FIGURE 1.9 – Réponse de l'antenne linéaire à capteurs équidistants (Haut : réponse linéaire. Bas : réponse en dB). $N_M = 13$, $f = 1000$ Hz, $d = 10$ cm, $\theta_0 = 0^\circ$.

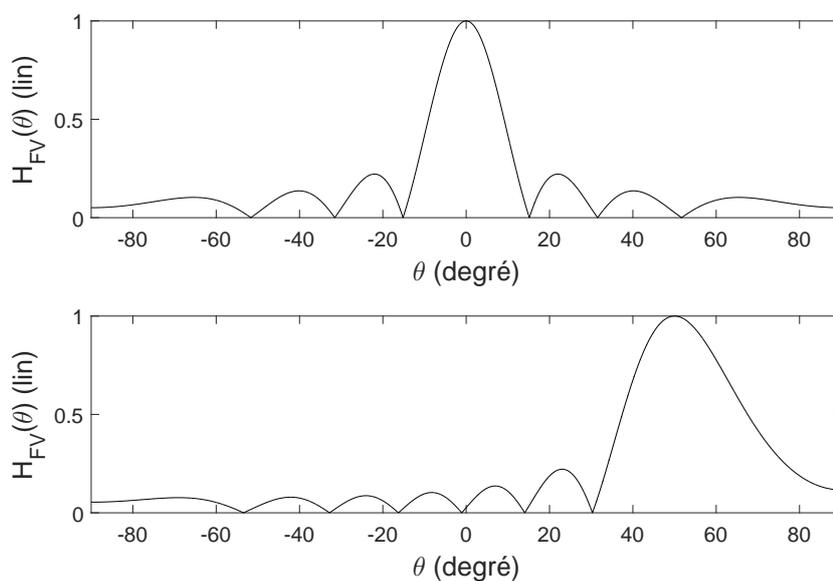


FIGURE 1.10 – Réponse de l'antenne linéaire selon différentes incidences (Haut : $\theta_0 = 0^\circ$, largeur à -3 dB : $5,6^\circ$. Bas : $\theta_0 = 50^\circ$, largeur à -3 dB : $8,7^\circ$). $N_M = 13$, $f = 1000$ Hz, $d = 10$ cm.

Un paramètre important est le rapport de la longueur d'onde λ sur la longueur de l'antenne $N_M d$. Les équations (1.18) et (1.19) permettent ainsi de mettre en évidence les propriétés suivantes :

- Pour une fréquence donnée, la résolution spatiale de l'antenne est meilleure si la longueur totale de l'antenne ($N_M \cdot d$) est grande.
- Pour une longueur d'antenne fixée, la résolution est meilleure dans les hautes fréquences que dans les basses fréquences.
- Pour une antenne et une fréquence données, la résolution est meilleure si la direction d'incidence θ_0 est proche de 0 (figure 1.10).

La résolution spatiale de l'antenne s'exprime en fonction de la longueur d'onde et de la longueur de l'antenne lorsqu'on considère les directions d'écoute, en traitement en ondes planes (champ lointain). En ondes sphériques (champ proche), la résolution spatiale fait intervenir la distance antenne-source. Elias et Malmarmey ont montré qu'à partir d'une longueur d'antenne environ égale à la distance antenne-source, la résolution n'est que peu améliorée par l'agrandissement de la longueur totale de l'antenne [Elias et Malmarmey 1983]. Cela permet en pratique de choisir la distance à laquelle placer l'antenne par rapport aux sources, pour une longueur d'antenne donnée.

Limite due à l'échantillonnage spatial

Le réseau de capteurs réalise un échantillonnage spatial du champ sonore. Pour certaines valeurs des paramètres f , d et θ_0 , le dénominateur de la réponse H_{FV} (eq. (1.16)) peut s'annuler : cela conduit à la présence d'un nouveau maximum dans la réponse de l'antenne et introduit donc une ambiguïté pour la localisation de la source (fig. 1.11). C'est le phénomène de *repliement* spatial, évité par la condition de Shannon qui garantit un échantillonnage correct du champ sonore :

$$d \leq \frac{\lambda_{min}}{2}$$

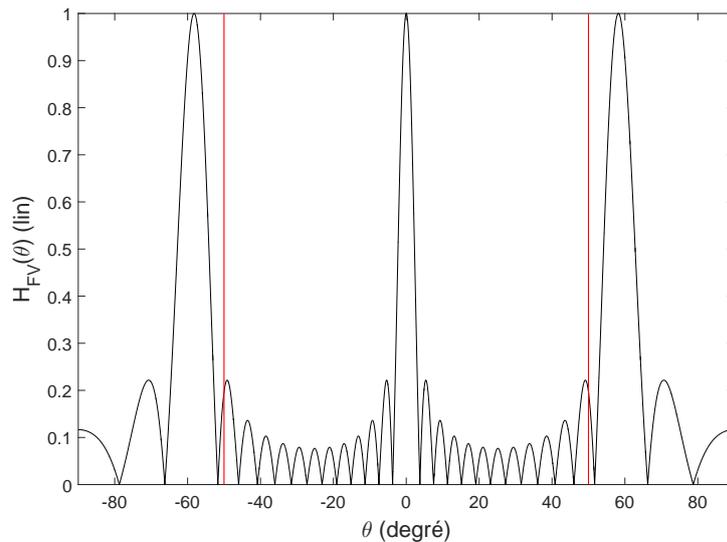


FIGURE 1.11 – Réponse de l'antenne linéaire : $N_M = 13$, $f = 2000$ Hz, $d = 20$ cm, $\theta_0 = 0^\circ$.

Étant donné la forme de la réponse du filtre, on peut se permettre de transgresser ce critère (lignes verticales rouges sur la figure 1.11) si la région spatiale des sources est restreinte et que l'on sait au préalable qu'il ne peut pas y avoir de source parasite dans les directions des lobes de repli.

Fenêtre de pondération

La performance de l'antenne peut être évaluée par sa résolution, mais aussi par sa dynamique, que l'on peut définir comme étant la différence de niveau entre le lobe principal de la réponse d'antenne et le premier lobe secondaire. En effet, une source faible se trouvant au niveau d'un lobe secondaire d'une source forte peut être masquée. Pour éviter d'omettre certaines sources, il faudrait pouvoir augmenter la dynamique de l'antenne, c'est-à-dire sa capacité à identifier des sources faibles même en présence de sources fortes proches.

Jusqu'ici, dans l'expression de la formation de voies, le même poids a été affecté à chaque capteur. Le champ sonore est ainsi observé à travers une fenêtre spatiale rectangulaire. Par analogie avec le fenêtrage temporel, on peut appliquer des coefficients de pondération w_m à chaque capteur m , et ainsi modifier la réponse de l'antenne. Cette pondération permet de réduire l'amplitude des lobes secondaires mais au détriment de la largeur du lobe principal : il est nécessaire de trouver un compromis entre résolution et dynamique. Avec pondération, les équations (1.2) et (1.4) de la formation de voies deviennent :

$$b(t, \theta) = \frac{1}{\sum_{m=0}^{N_M-1} w_m} \sum_{m=0}^{N_M-1} w_m p_m \left(t + m \frac{d \sin \theta}{c} \right) \quad (1.20)$$

pour la formation de voies en onde plane et

$$b(t, F, C) = \frac{1}{\sum_{m=0}^{N_M-1} w_m} \sum_{m=0}^{N_M-1} w_m \frac{r_{Fm}}{r_{FC}} p_m \left(t + \frac{r_{Fm} - r_{FC}}{c} \right) \quad (1.21)$$

pour la focalisation en champ proche. La formulation optimale s'écrit :

$$b(t, F) = \frac{\sum_{m=0}^{N_M-1} \frac{w_m}{r_{Fm}} p_m \left(t + \frac{r_{Fm}}{c} \right)}{\sum_{m=0}^{N_M-1} \frac{w_m}{r_{Fm}^2}} \quad (1.22)$$

1.2.2.4 Géométries d'antenne

Si l'on considère à la fois le critère de longueur totale de l'antenne qui doit être suffisamment grande pour avoir une bonne résolution à basse fréquence, et le critère d'échantillonnage spatial qui impose que les capteurs soient suffisamment proches les uns des autres pour éviter le repliement à haute fréquence, on comprend que pour pouvoir idéalement couvrir une gamme de fréquences étendue, il faudrait disposer d'une quantité considérable de capteurs. Ce constat pose un problème pratique de mise en œuvre tant en coût qu'en complexité expérimentale.

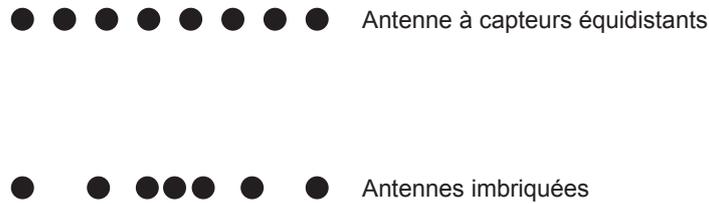


FIGURE 1.12 – Exemples de géométries d'antenne linéaire.

Une solution simple consiste à considérer des antennes dites "imbriquées" (fig 1.12), c'est-à-dire constituées de plusieurs sous-antennes régulières d'espacements inter-capteurs différents, certains capteurs étant communs à plusieurs sous-antennes (fig 1.13a). Une solution plus complexe consiste à appliquer une pondération variable en fréquence et spécifique à chaque capteur dans la formation de voies, permettant d'obtenir un lobe principal de localisation de largeur à peu près constante sur toute la gamme de fréquence étudiée [Pallas et Perrier 2009] (fig 1.13b).

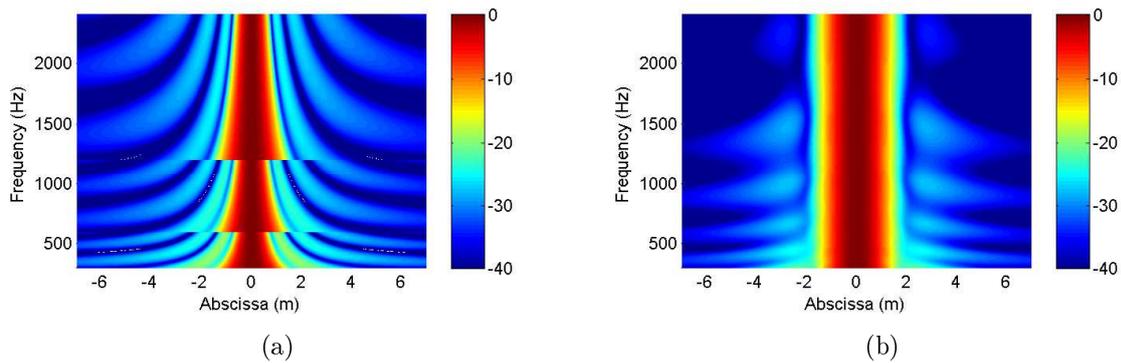


FIGURE 1.13 – Réponse d'antenne imbriquée (a) et à directivité constante (b) [Pallas et Perrier 2009].

Les développements et exemples donnés jusqu'à présent considéraient une antenne linéaire, à une dimension. Cependant, une telle antenne ne permet une localisation que selon une seule direction. Pour rechercher des sources selon deux dimensions de l'espace, il est nécessaire d'utiliser des antennes dont les capteurs se répartissent dans un plan, et de manière analogue, la localisation d'une source dans une région de l'espace selon trois dimensions requiert l'utilisation d'une antenne en trois dimensions. De nombreux travaux étudient spécifiquement les différentes géométries possibles pour des antennes 2D et 3D.

Certains auteurs proposent de définir une géométrie d'antenne par le biais de tirages aléatoires de positions des capteurs [Bai et al. 2010, Gerstoft et Hodgkiss 2011, del Val et al. 2012] selon des algorithmes randomisés (Monte-Carlo par exemple) ou encore des algorithmes génétiques [Le Courtois et al. 2010; 2016]. La disposition retenue est alors le fruit d'une méthode d'optimisation sous certains critères tels que la résolution d'antenne ou encore sa dynamique. Cette approche a été majoritairement étudiée pour des antennes 2D, donnant lieu à un échantillonnage spatial pseudo-aléatoire.

1.2.2.5 Formation de voies : formulation temporelle ou fréquentielle ?

Lorsqu'on veut appliquer la formation de voies à un problème donné, se pose le problème du choix de la formulation – temporelle ou fréquentielle – de la méthode. Jaeckel propose ainsi une analyse des forces et faiblesses de la formation de voies en temporel (par opposition à sa formulation fréquentielle) [Jaeckel 2006]. La formulation temporelle présente l'avantage de traiter toutes les fréquences en même temps, c'est-à-dire que la méthode est intrinsèquement large bande, bien que sa résolution varie en fonction de la fréquence. Elle est par conséquent bien adaptée au traitement de sources large bande, comme c'est habituellement le cas pour des bruits de véhicules routiers. De plus, contrairement à la formulation fréquentielle, elle n'utilise pas de matrices interspectrales dont l'estimation nécessite de disposer de signaux suffisamment longs, ce qui fait précisément défaut dans le cadre du bruit au passage de véhicules routiers. Enfin, toujours dans ce cadre, la formulation temporelle permet de corriger l'effet Doppler (voir section 1.2.3), tâche bien plus ardue dans le domaine fréquentiel.

Certains aspects sont néanmoins plus intéressants dans la formulation fréquentielle que dans la formulation temporelle. C'est en particulier le cas du temps de calcul dans une application statique, qui est plus long pour la formulation temporelle en particulier à cause de l'interpolation nécessaire pour calculer les échantillons de signal correspondant aux signaux retardés. Ceci est d'autant plus vrai que la fréquence d'échantillonnage est élevée, celle-ci étant dépendante des fréquences étudiées. De plus, les produits matriciels dans le domaine fréquentiel correspondant à des produits de convolution dans le domaine temporel, cela rend l'implémentation de certains algorithmes de traitement du signal ou de correction plus ardue en pratique.

Ces perspectives permettent d'orienter notre choix vers la formulation temporelle de la formation de voies pour étudier le bruit au passage de véhicules, malgré les inconvénients qu'elle présente par rapport à la formulation fréquentielle. Bien que l'application de cette dernière ne soit pas impossible dans ce cas précis, comme nous le verrons par la suite, son adaptation reste compliquée et repose sur certaines hypothèses qui se vérifient difficilement.

1.2.2.6 Déconvolution de sources statiques

La formation de voies a des limites bien connues [Johnson et Dudgeon 1993], explicitées précédemment dans la section 1.2.2.3. Celles-ci sont principalement liées à l'étendue spatiale de la réponse d'antenne, menant à l'étalement de l'image des sources obtenue par cette méthode. Ce constat est à la base des méthodes dites de déconvolution, dont le but est de trouver les sources pouvant être à l'origine de la cartographie de formation de voies. L'approche consiste donc à effectuer une première identification de zones sources par formation de voies, puis de raffiner cette analyse par un traitement déconvolutif effectué sur sa sortie.

Nous verrons dans cette partie le principe de la déconvolution en explicitant différents algorithmes disponibles dans la littérature.

1.2.2.6.1 Le principe de la déconvolution

La déconvolution est un traitement qui opère la plupart du temps dans le domaine fréquentiel, nous allons donc reprendre les notations de la section 1.2.2.2. Pour plus de clarté, les dépendances fréquentielles des variables seront sous-entendues, ce traitement s'effectuant fréquence

par fréquence. On considère à présent un ensemble de N_S sources réparties dans un plan-source échantillonné pour la formation de voies, appelé grille-source. $\mathbf{s}(f)$ est le vecteur dont les composantes sont les $s_1(f) \dots s_{N_S}(f)$. Pour rappel, les signaux des microphones s'obtiennent par :

$$\mathbf{p} = \bar{\mathbf{G}}\mathbf{s} \quad (1.23)$$

et la sortie de formation de voies s'écrit :

$$\mathbf{b} = \bar{\mathbf{W}}^H \mathbf{p} \quad (1.24)$$

où \mathbf{p} est le vecteur comprenant l'ensemble des transformées de Fourier des N_M signaux microphones, et $\bar{\mathbf{G}}$ et $\bar{\mathbf{W}}$ sont des matrices $N_M \times N_S$ dont les colonnes sont respectivement les vecteurs \mathbf{G} et \mathbf{W} tels que définis dans 1.2.2.2.

En remplaçant \mathbf{p} par son expression donnée par (1.23) dans (1.24) :

$$\mathbf{b} = \bar{\mathbf{W}}^H \bar{\mathbf{G}}\mathbf{s} \quad (1.25)$$

par conséquent, en énergie, il vient :

$$\mathbf{B} = E\{(\bar{\mathbf{W}}^H \bar{\mathbf{G}}\mathbf{s})(\bar{\mathbf{W}}^H \bar{\mathbf{G}}\mathbf{s})^H\} = \bar{\mathbf{W}}^H \bar{\mathbf{G}} E\{\mathbf{s}\mathbf{s}^H\} \bar{\mathbf{G}}^H \bar{\mathbf{W}} \quad (1.26)$$

où l'on reconnaît la matrice interspectrale des sources $\bar{\mathbf{\Gamma}}_S = E\{\mathbf{s}\mathbf{s}^H\}$. Dans l'hypothèse où les sources sont décorréélées, il s'agit d'une matrice diagonale dont les termes diagonaux sont les autospectres des sources. On peut alors écrire :

$$\mathbf{B}(f) = \bar{\mathbf{H}}(f)\mathbf{S}(f) \quad (1.27)$$

où $\mathbf{B}(f)$ est le vecteur quadratique en sortie de la formation de voies pour les points de focalisation analysés, $\mathbf{S}(f)$ est le vecteur des autospectres des sources à la fréquence f et $\bar{\mathbf{H}}(f)$ est la matrice traduisant la réponse du traitement d'antenne au modèle de source, ses éléments étant donnés par $H_{nk} = |w_n^* G_k|^2$ où w_n est le vecteur de pointage pour le point focal F_n et G_k est le vecteur des fonctions de Green sur les capteurs pour la source k ($k = 1 \dots N_S$). Les colonnes de la matrice $\bar{\mathbf{H}}$ sont généralement appelées *Point Spread Functions* (PSF) en anglais ou *Fonctions d'étalement du point*, qui traduisent le passage d'une source ponctuelle à une image observée étalée.

On cherche donc à déterminer une estimée $\mathbf{S}_\alpha(f)$ (positive car il s'agit d'une grandeur quadratique) de $\mathbf{S}(f)$ minimisant l'erreur quadratique entre le résultat de mesure $\mathbf{B}(f)$ et le modèle (1.27) :

$$\mathbf{S}_\alpha(f) = \min_{\mathbf{S}(f)} \|\mathbf{B}(f) - \bar{\mathbf{H}}(f)\mathbf{S}(f)\| \quad \text{et} \quad \mathbf{S}_\alpha(f) \geq 0 \quad (1.28)$$

Dès lors, il s'agit de définir un modèle d'émission (type de sources, directivité,...) et de propagation (atténuation, déphasage, etc.) correspondant au problème et donc au traitement de formation de voies qui a été fait au préalable. On se trouve alors face à un problème d'optimisation classique qui peut être résolu selon différents algorithmes. Les méthodes les plus connues sont NNLS [Lawson et Hanson 1995], CLEAN [Högbon 1974] et DAMAS [Brooks et Humphreys 2004; 2006], ces deux dernières ayant des variantes (CLEAN-SC [Sijtsma 2007], DAMAS2 [Dougherty 2005]) qui cherchent à améliorer leur résolution ou encore leur vitesse d'exécution.

1.2.2.6.2 Algorithme de déconvolution : NNLS

L'algorithme NNLS *non-negative least squares*, tel que décrit dans [Lawson et Hanson 1995] met en œuvre une méthode de gradient. Il est formulé dans ce qui suit pour chaque fréquence f (la dépendance en fréquence des variables ne sera pas notée pour un gain de clarté) :

1. On pose deux ensembles d'indices \mathcal{P} et \mathcal{Z} , initialisés ainsi : $\mathcal{P} = \{\}$ et $\mathcal{Z} = \{1, 2, \dots, N_S\}$.
On initialise également le vecteur des autospectres $\mathbf{S}_\alpha = 0$.
2. Calcul du vecteur de taille N_S : $\mathbf{a} = \bar{\mathbf{H}}^T (\mathbf{B} - \bar{\mathbf{H}} \mathbf{S}_\alpha)$.
3. Si \mathcal{Z} est vide ou si $a_j \leq 0, \forall j \in \mathcal{Z}$, aller à l'étape 10.
4. Trouver un indice $i_1 \in \mathcal{Z}$ tel que $a_{i_1} = \max(a_j, \forall j \in \mathcal{Z})$ et le déplacer de l'ensemble \mathcal{Z} à l'ensemble \mathcal{P} .
5. Soit $\bar{\mathbf{H}}_{\mathcal{P}}$ la matrice définie par :

$$\text{Colonne } j \text{ de } \bar{\mathbf{H}}_{\mathcal{P}} = \begin{cases} \text{colonne } j \text{ de } \bar{\mathbf{H}} & \text{si } j \in \mathcal{P} \\ 0 & \text{si } j \in \mathcal{Z} \end{cases}$$

Calcul du vecteur \mathbf{b} comme solution aux moindres carrés de $\bar{\mathbf{H}}_{\mathcal{P}} \mathbf{b} \approx \mathbf{B}$. Cela ne donnant que les $b_j, j \in \mathcal{P}$, on définit également $b_j = 0 \forall j \in \mathcal{Z}$.

6. Si $b_j > 0 \forall j \in \mathcal{P}$, on pose $\mathbf{S}_\alpha = \mathbf{b}$ et on retourne à l'étape 2.
7. Trouver un indice i_2 tel que :

$$\frac{S_{\alpha_{i_2}}}{(S_{\alpha_{i_2}} - b_{i_2})} = \min \left[\frac{S_j}{(S_j - b_j)}, b_j \leq 0, j \in \mathcal{P} \right]$$

8. Soit $\beta = \frac{S_{\alpha_{i_2}}}{S_{\alpha_{i_2}} - b_{i_2}}$, on pose alors $\mathbf{S}_\alpha = \mathbf{S}_\alpha + \beta(\mathbf{b} - \mathbf{S}_\alpha)$.
9. On fait passer de \mathcal{P} à \mathcal{Z} tous les indices $j \in \mathcal{P}$ pour lesquels $S_{\alpha_j} = 0$. Retourner à l'étape 6.
10. Fin de l'algorithme.

1.2.2.6.3 Algorithme de déconvolution : DAMAS

DAMAS est l'acronyme anglais de *deconvolution approach for the mapping of acoustic sources* [Brooks et Humphreys 2004]. Il repose sur la résolution d'un système d'équations par la méthode itérative de Gauss-Seidel. En effet, alors qu'on pouvait considérer le problème de la déconvolution $\mathbf{B}(f) = \bar{\mathbf{H}}(f) \mathbf{S}(f)$ de manière matricielle, on peut également le considérer comme un système d'équation ligne par ligne. Ainsi, une équation linéaire de ce système est :

$$H_{n1}S_1 + H_{n2}S_2 + \dots + H_{nn}S_n + \dots + H_{nN_S}S_{N_S} = B_n \quad (1.29)$$

et on peut écrire la ligne correspondant à l'indice n ainsi :

$$S_n = \frac{B_n}{H_{nn}} - \frac{1}{H_{nn}} \left[\sum_{n'=1}^{n-1} H_{nn'} S_{n'} + \sum_{n'=n+1}^{N_S} H_{nn'} S_{n'} \right] \quad (1.30)$$

On utilise alors un algorithme itératif pour obtenir S_n pour tout $n = 1 \dots N_S$:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1^{(i)} = \frac{B_1}{H_{11}} - \frac{1}{H_{11}} \left[0 + \sum_{n'=1+1}^{N_S} H_{1n'} S_{n'}^{(i-1)} \right] \\ S_n^{(i)} = \frac{B_n}{H_{nn}} - \frac{1}{H_{nn}} \left[\sum_{n'=1}^{n-1} H_{nn'} S_{n'}^{(i)} + \sum_{n'=n+1}^{N_S} H_{nn'} S_{n'}^{(i-1)} \right] \\ S_{N_S}^{(i)} = \frac{B_{N_S}}{H_{N_S N_S}} - \frac{1}{H_{N_S N_S}} \left[\sum_{n'=1}^{N_S-1} H_{N_S n'} S_{n'}^{(i)} + 0 \right] \end{array} \right. \quad (1.31)$$

Pour la première itération, la valeur initiale de S_n peut être prise à 0 ou à $\frac{B_n}{H_{nn}}$ (cela change peu le taux de convergence). Il faut également s'assurer de la contrainte de positivité (comme énoncée dans (1.28)), et imposer $S_n = \max(0, S_n)$ après chaque détermination de S_n (on règle ainsi ce problème directement dans l'itération). Chaque itération est ensuite complétée par des calculs en sens inverse (de $n = N_S$ à 1) pour lisser les pas d'itération.

Ehrenfried et Koop analysent de façon approfondie les principales techniques de déconvolution existantes, avec une application sur des simulations numériques [Ehrenfried et Koop 2007]. À propos de DAMAS, le premier point soulevé concerne la convergence de la méthode, qui n'est pas nécessairement assurée contrairement à un algorithme classique de Gauss-Seidel, à cause de la modification apportée pour vérifier la contrainte de positivité. Les auteurs soulignent également le fait que cette convergence peut aussi dépendre de l'ordre dans lequel on résout le système linéaire.

Un autre inconvénient de cet algorithme est qu'il peut, dans certains cas, être très coûteux en temps de calcul. Ce dernier est significativement réduit grâce à des modifications telles que DAMAS2 et DAMAS3 [Dougherty 2005] qui sont valides dans le cas où la PSF peut être considérée comme invariante spatialement, et correspondant à la PSF pour le centre de la grille-source. Une régularisation est également introduite afin d'améliorer la stabilité de ces algorithmes. Ehrenfried et Koop montrent que les résultats donnés par une telle approche sont bons à condition que l'ouverture de l'antenne, c'est-à-dire l'écart angulaire entre les points extrêmes de la grille-source, soit petite devant la distance entre le plan-source et l'antenne.

Par ailleurs, un compromis entre temps de calcul et précision consiste à intégrer DAMAS2 dans une boucle d'itération extérieure, permettant de prendre en compte la variation spatiale de la PSF. Si cette intégration n'est pas avantageuse dans tous les cas (par exemple pour une faible ouverture d'antenne), elle permet a minima d'assurer une meilleure convergence que l'algorithme DAMAS, ce qui réduit le nombre d'itérations requis. Les avantages apportés par DAMAS2 et par cette dernière approche hybride peuvent également s'appliquer à NNLS.

1.2.2.6.4 Approches heuristiques : CLEAN et ses variantes

Les approches heuristiques ne cherchent pas à résoudre numériquement le problème (1.28), mais à trouver une estimation des sources qui minimise à la fois l'erreur quadratique d'estimation et la norme L0 de la solution, par le biais d'un algorithme itératif. Un algorithme bien connu pour son application en acoustique est CLEAN. Le principe de cet algorithme sera à la base de la méthode originale proposée au Chapitre 2 pour identifier des sources mobiles.

CLEAN a été proposé pour la première fois par Högbom [Högbom 1974] pour une application en astronomie, en utilisant les mesures de différents radio-télescopes. Par la suite, cet algorithme a été adapté à l'acoustique, notamment par Boone [Boone 1987] puis par Dougherty et Stoker [Dougherty et Stoker 1998] avant d'être employé et étudié couramment dans ce domaine. Sijtsma a notamment proposé une extension de l'algorithme appelée CLEAN-SC [Sijtsma 2007] qui prend en compte la cohérence spatiale des sources.

L'algorithme initial consiste à balayer l'espace des sources pour trouver la position et le niveau associé du point-source produisant le niveau le plus élevé en sortie de formation de voies. On retire alors la contribution de cette source dans la cartographie dite *dirty*, initialisée par la sortie de formation de voies, calculant ainsi une cartographie acoustique résiduelle. La source identifiée, représentée par une source ponctuelle de puissance appropriée, est quant à elle incluse dans une autre cartographie, dite *clean*. A l'itération suivante, on cherche à nouveau la position du maximum dans la cartographie *dirty* mise à jour, que l'on retirera avant de mettre également à jour la cartographie *clean*. Les itérations se succèdent ainsi jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint. En fin de chaque itération, il faut également s'assurer de la positivité des valeurs dans la cartographie résiduelle, qui sont des valeurs quadratiques. À la fin, l'algorithme aura isolé les sources de bruit principales.

1. Initialisation de la *dirty-map* $\mathbf{\Omega}$ et de la *clean-map* $\mathbf{\Lambda}$ à l'indice d'itération $i = 1$:

$$\begin{aligned}\mathbf{\Omega}^{(i=1)} &= \mathbf{B} \\ \mathbf{\Lambda}^{(i=1)} &= \mathbf{0}\end{aligned}\tag{1.32}$$

2. Recherche de l'indice du point-source correspondant au maximum des éléments $\Omega_n^{(i)}$ de $\mathbf{\Omega}^{(i)}$:

$$n_{\max}^{(i)} = \arg \max_n \Omega_n^{(i)}\tag{1.33}$$

3. Calcul de la cartographie résiduelle :

$$\mathbf{\Omega}^{(i+1)} = \mathbf{\Omega}^{(i)} - \gamma H_{n_{\max}^{(i)}} \mathbf{\Omega}_{n_{\max}^{(i)}}^{(i)}\tag{1.34}$$

γ étant un facteur de boucle compris entre 0 et 1 et qui permet une meilleure robustesse de l'algorithme.

4. Mise à jour de la cartographie "propre" :

$$\mathbf{\Lambda}_{n_{\max}^{(i)}}^{(i+1)} = \mathbf{\Lambda}_{n_{\max}^{(i)}}^{(i)} + \gamma \mathbf{\Omega}_{n_{\max}^{(i)}}^{(i)}\tag{1.35}$$

5. Application de la contrainte de positivité :

$$\Omega_n^{(i+1)} = \max(0, \Omega_n^{(i+1)}) \text{ pour tout } n = 1 \dots N_S\tag{1.36}$$

6. Une nouvelle itération commence à partir de l'étape 2 à moins que l'un des critères d'arrêt soit rempli.

Plusieurs critères d'arrêt peuvent être définis, le critère d'arrêt optimal variant selon le cas étudié. Par exemple, à chaque itération, la quantité d'énergie totale restant dans la cartographie

dirty devrait décroître. Cependant, lorsque toutes les principales sources ont été retirées, il ne reste que du bruit et l'énergie de la cartographie risque d'augmenter à partir de ce moment-là : un critère d'arrêt possible est $\|\mathbf{\Omega}^{(i+1)}\| \leq \|\mathbf{\Omega}^{(i)}\|$. On peut également définir ce critère sur le taux de décroissance de l'énergie dans la cartographie *dirty* (lorsque la perte d'énergie d'une itération à l'autre est inférieure à une valeur seuil). Ce choix est à adapter selon le cas et en fonction du temps de calcul désiré ainsi que de la précision voulue. Un nombre maximal d'itérations peut également être défini pour éviter un temps de calcul trop long en cas d'incertitude sur le critère à appliquer.

Le facteur de boucle $\gamma \in [0, 1]$ est choisi de manière à ne retirer qu'une partie de l'estimation de la source dominante trouvée à chaque itération. En effet, cette estimation à cette position est susceptible de contenir également des contributions provenant de lobes secondaires de sources voisines. Pour une robustesse optimale de l'algorithme, on devrait en théorie choisir une valeur assez faible de γ . Cependant, plus le facteur de boucle est faible, plus l'algorithme est long : le choix de ce paramètre dépend de la situation et l'utilisateur doit tester plusieurs valeurs afin de trouver le meilleur compromis entre robustesse de l'algorithme et rapidité d'exécution.

L'idée de CLEAN-SC (pour "CLEAN based on Source Coherence") est de dépasser les inconvénients des méthodes basées sur la PSF, en particulier le fait que la propagation réelle des sources vers l'antenne n'est pas nécessairement bien modélisée, cette propagation étant traduite par la PSF. Des sources réelles peuvent par exemple être étendues spatialement au lieu d'être ponctuelles, l'hypothèse de source ponctuelle étant généralement faite pour le calcul de la PSF [Sijtsma 2007]. De même, on fait généralement l'hypothèse d'une directivité uniforme des sources, ce qui n'est pas nécessairement le cas. La méthode CLEAN-SC utilise le fait que dans une cartographie de formation de voies, il y a cohérence des lobes secondaires avec le lobe principal d'une même source. Il s'agit donc de retirer de la cartographie *dirty* toutes les contributions du signal qui sont cohérentes avec la source ponctuelle maximale identifiée à chaque itération.

Une amélioration récente de cet algorithme, appelée HR-CLEAN-SC (pour "High Resolution CLEAN-SC") a été proposée par Sijtsma et al. [Sijtsma et al. 2017]. Il s'agit de traiter des sources qui sont trop proches pour être séparées par la formation de voies conventionnelle, et dont les algorithmes CLEAN et CLEAN-SC donnent une localisation erronée. Plutôt que d'associer une localisation définitive à la source maximale à chaque itération, on lui attribue une position en plaçant un "marqueur" qui minimise l'influence des autres sources sur le résultat de formation de voies de cette source. La mise à jour itérative du problème se fait à l'aide de ces marqueurs qui "décalent" les PSF des sources proches : ainsi, au lieu de n'avoir qu'un unique lobe de formation de voies correspondant à la somme des lobes de deux sources proches, deux lobes plus faibles émergent côte à côte au fur et à mesure des itérations, pour au final trouver la bonne position des sources.

Enfin, l'algorithme RELAX utilisant la même philosophie que CLEAN a été proposé pour apporter plus de robustesse à la méthode [Li et Stoica 1996, Wang et al. 2003]. Le fonctionnement est analogue à CLEAN, cependant à chaque itération i identifiant une nouvelle source, l'ensemble des sources précédemment trouvées est réajusté pour tenir compte des effets de la nouvelle source i sur leurs contributions. Cela apporte une correction à l'estimation des sources à chaque itération, l'inconvénient majeur étant bien sûr le temps de calcul plus long que dans la procédure CLEAN classique.

1.2.2.6.5 Illustration numérique de méthodes de déconvolution

Au moment de traiter d'un problème d'identification de sources se pose la question du choix d'un algorithme de déconvolution. On peut s'appuyer sur l'analyse d'Ehrenfried et Koop [Ehrenfried et Koop 2007] afin de déterminer l'algorithme le mieux adapté à la situation étudiée. La figure 1.15 illustre les résultats que l'on peut obtenir par les algorithmes DAMAS, NNLS et CLEAN, mis en comparaison avec la formation de voies.

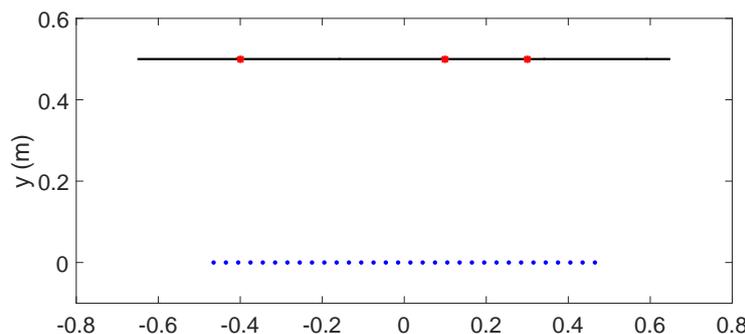


FIGURE 1.14 – Configuration d'antenne et de sources du cas simulé.

Pour cette comparaison, trois sources monopolaires décorréélées émettant un bruit blanc de même niveau ont été considérées. Elles sont positionnées aux abscisses $[-0,4; 0,1; 0,3]$ m et alignées sur une droite située à une distance de 0,5 m de l'antenne de capteurs. Celle-ci est constituée de 32 capteurs, régulièrement espacés de 5 cm. Cette configuration est représentée dans la figure 1.14.

La gamme de fréquence étudiée va de 500 Hz à 8 kHz. La fréquence la plus élevée correspond à une longueur d'onde d'environ 4 cm, soit une demi-longueur d'onde de 2 cm. On constate qu'avec des capteurs espacés de 3 cm, on transgresse légèrement le critère de Shannon évoqué dans la section 1.2.2.3 à la limite de la gamme de fréquence. Il s'agit d'un cas où l'on peut se permettre cette transgression au regard de la disposition des sources et de la zone de l'espace explorée. On peut également remarquer sur la sortie de formation de voies (fig. 1.15a) l'effet d'une focalisation de l'antenne à des angles plus élevés : la source la plus à gauche, excentrée par rapport au centre de l'antenne, a un étalement spatial plus prononcé que les deux autres sources qui sont plus proches du centre de l'antenne, en particulier la source positionnée à l'abscisse 0,1 m.

Comme attendu, la formation de voies rend une image mieux localisée à haute fréquence qu'à basse fréquence. On remarque que les lobes secondaires des sources se combinent de manière constructive et destructive pour créer un motif plus complexe que dans le cas d'une source unique (fig. 1.15a). On constate sur les cartographies de déconvolution (fig. 1.15b à 1.15d) que ces trois méthodes offrent un résultat bien localisé à haute fréquence, avec la disparition totale des lobes secondaires sauf pour DAMAS dans laquelle ils sont toujours présents, mais à un niveau et avec une étendue bien plus faibles que dans la FV (fig. 1.15b). Dans les quatre cartographies, les sources sont trouvées aux abscisses prévues en considérant la position correspondant au niveau maximal pour DAMAS et la formation de voies (table 1.1). Les méthodes de déconvolution étant développées dans le but de pallier les faiblesses de la formation de voies, intéressons-nous maintenant à ses deux principaux aspects limitants, la résolution à basse fréquence et la

quantification de sources voisines.

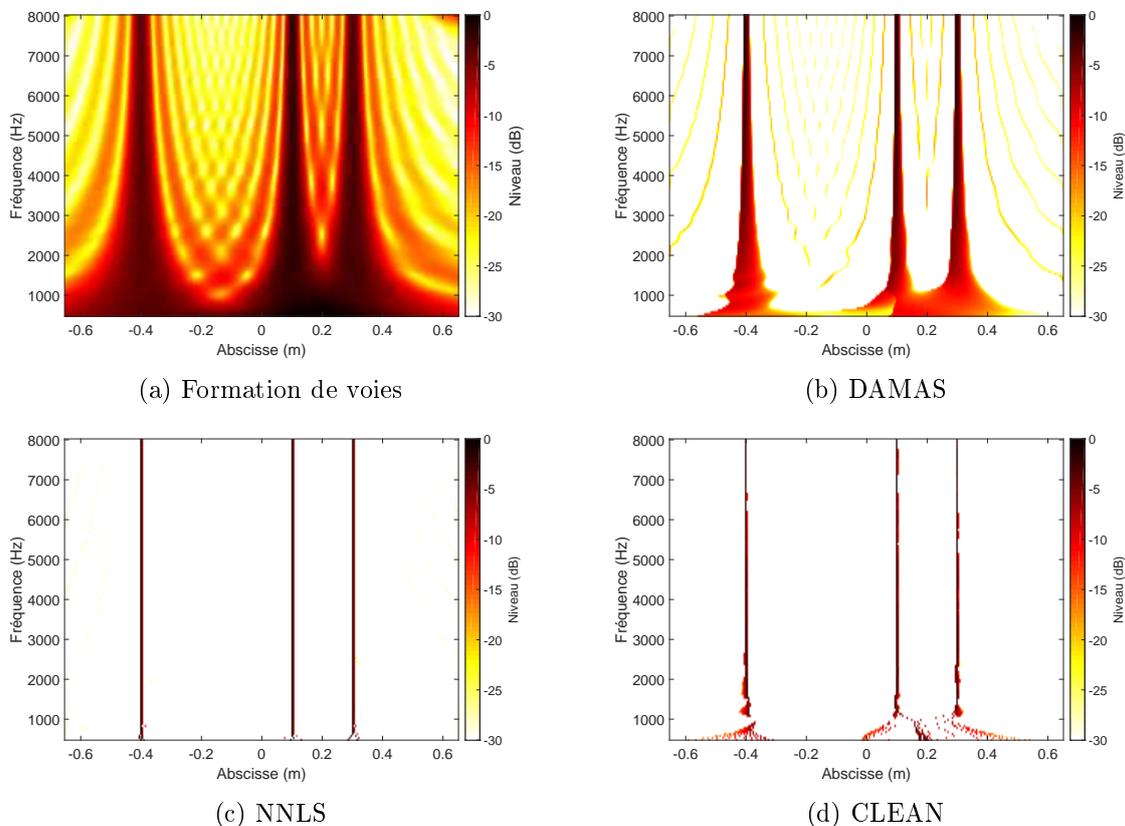


FIGURE 1.15 – Comparaison de trois méthodes de déconvolution avec la formation de voies en référence. Antenne linéaire (32 microphones, espace intercapteurs 5 cm), distance antenne-source 50 cm, 3 sources décorrélées.

Pour le premier point, l'apport de la déconvolution est incontestable, du moins jusqu'à un certain point : on remarque que l'image se dégrade malgré tout à partir d'une fréquence qui varie selon la méthode considérée. En effet, on retrouve dans le cas de DAMAS une évolution similaire à la formation de voies, avec un élargissement progressif de l'image des sources à mesure que la fréquence diminue, effet qui devient véritablement gênant en dessous d'environ 1,2 kHz ici pour les deux sources de droite qui sont alors mélangées (fig. 1.15b). CLEAN présente des sources très localisées avec l'apparition à certaines fréquences de sources secondaires : on dénombre au maximum trois sources candidates pour chacune des sources principales considérées jusqu'à environ 2 kHz (fig. 1.15d). C'est en dessous de cette fréquence que l'image produite se dégrade avec l'apparition de sources potentielles plus nombreuses, jusqu'à la limite de 1 kHz où les sources deviennent totalement dispersées et difficilement identifiables. NNLS est dans ce cas l'algorithme qui donne le meilleur résultat : les trois sources sont très bien localisées, avec sur l'ensemble de la gamme de fréquence uniquement deux sources potentielles par source réelle (fig. 1.15c). Cet effet est observé lorsque la source identifiée se situe entre deux points de la grille-source, elle est alors représentée comme deux sources adjacentes. NNLS rend un résultat précis et sans dispersion au

dessus d'environ 600-700 Hz selon les sources, soit pratiquement la limite basse de la gamme de fréquence étudiée. La résolution à basse fréquence est donc bien améliorée par chaque méthode de déconvolution par rapport à la formation de voies, mais à divers degrés de performance.

TABLE 1.1 – Estimation de la position (m) et du niveau (dB) des sources à la fréquence 7 kHz.

Méthode	Source 1		Source 2		Source 3	
	Position	Niveau	Position	Niveau	Position	Niveau
FV	-0,4	-4	+0,1	-2,1	+0,3	-3,1
DAMAS	-0,4	-1,5	+0,1	-0,6	+0,3	-1,3
NNLS	-0,4	-0,7	+0,1	-0,7	+0,3	-0,7
CLEAN	-0,4	-2,7	+0,1	-1,3	+0,3	-2,7

Concernant l'aspect quantification des sources, celles-ci étant simulées avec un niveau égal et normalisé, on devrait retrouver le même niveau pour chaque source, idéalement 0 dB. Intéressons-nous au niveau trouvé par exemple à la fréquence 7 kHz, pour laquelle toutes les méthodes présentent une bonne résolution (table 1.1). Bien que les valeurs puissent varier d'une fréquence à l'autre, les tendances que l'on peut tirer de l'étude d'une fréquence particulière se confirment dans notre cas sur l'ensemble de la gamme. On constate tout d'abord que le niveau est sous-estimé par toutes les méthodes, de manière notable pour la formation de voies et pour CLEAN (mais dans une moindre mesure). NNLS est quant à elle la méthode la plus proche du niveau théorique. Le deuxième point intéressant est l'écart de niveau entre les sources, qui devrait être théoriquement nul. Or on relève un écart maximal entre deux sources de 2 dB pour la formation de voies, 1 dB pour DAMAS et 1,5 dB pour CLEAN, tandis que NNLS trouve des niveaux identiques pour toutes les sources. Sur le cas simulé, il est clair que l'algorithme NNLS est le plus performant, suivi dans l'ordre de DAMAS puis de CLEAN.

L'amélioration apportée par les méthodes de déconvolution par rapport à la formation de voies seule est flagrante : si la localisation reste inchangée, en considérant la position du niveau maximal pour les méthodes rendant une image étalée, la résolution est améliorée sur une gamme de fréquence plus étendue. NNLS apparaît comme l'algorithme le plus performant, suivi de CLEAN puis de DAMAS. En termes de quantification, la déconvolution par les trois méthodes testées permet d'améliorer les performances de la formation de voies, avec toujours NNLS qui produit les meilleurs résultats, suivi cette fois de DAMAS puis de CLEAN. NNLS semble ainsi être un bon choix pour l'étude de sources monopolaires décorréées, mais il convient de noter que les performances des méthodes de déconvolution peuvent largement varier selon la situation (sources corrélées ou non, monopôle, dipôle, source étendue, etc.). Une comparaison avec un plus grand nombre de cas et d'algorithmes considérés peut être consultée dans [Leclere et al. 2016].

1.2.3 Formation de voies et déconvolution – cas des sources mobiles

Nous avons vu dans les parties précédentes des méthodes d'imagerie acoustique utilisées pour identifier des sources de bruit statiques. Cependant, notre cas d'étude met en jeu des sources mobiles (véhicules routiers). Nous nous intéressons dans ce qui suit aux spécificités d'un tel contexte, en particulier les effets du mouvement sur le signal reçu par les microphones et

comment adapter les méthodes et techniques présentées précédemment pour caractériser de telles sources.

1.2.3.1 Formation de voies avec suivi de source

Lorsqu'une source acoustique est en mouvement par rapport à un récepteur, celui-ci reçoit le signal provenant de la source de manière altérée, à la fois en amplitude et en fréquence. Ces altérations du signal dégradent les performances de l'antenne en fonctionnement tel qu'explicité jusqu'à présent. Il convient donc d'employer une stratégie permettant de compenser ces altérations. Après une courte description de la cinématique du problème, l'étude dynamique du champ de pression permettra d'exprimer les coefficients traduisant ces phénomènes. Il existe différentes manières d'aborder ce problème, nous nous baserons ici sur l'analyse qui en est faite par Morse et Ingard [Morse et Ingard 1992].

1.2.3.1.1 Cinématique

Soit une source omnidirectionnelle S de coordonnées (x_S, y_S, z_S) animée d'un mouvement linéaire à vitesse constante v , et un observateur O immobile repéré par ses coordonnées (x, y, z) . On considère que la source est en $x = 0$ à $t = 0$ et qu'elle suit une trajectoire rectiligne suivant l'axe \vec{x} : on a donc $x_S(t) = vt$. La pression observée en O à l'instant t a été émise par la source S à l'instant t_e .

Soit R la distance qui sépare O et S à l'instant t_e et θ l'angle formé par la direction \overrightarrow{OS} et l'axe de déplacement de S (figure 1.16).

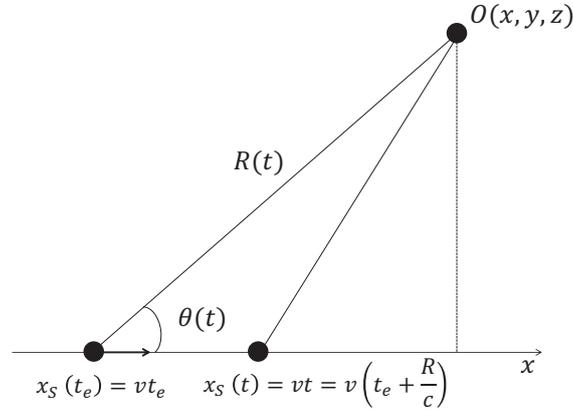


FIGURE 1.16 – Cinématique de la source ponctuelle à vitesse constante

On peut donc exprimer R de la manière suivante :

$$R^2(t) = [x - x_S(t_e)]^2 + [y - y_S(t_e)]^2 + [z - z_S(t_e)]^2$$

$$R^2(t) = \left[x - x_S \left(t - \frac{R(t)}{c} \right) \right]^2 + \left[y - y_S \left(t - \frac{R(t)}{c} \right) \right]^2 + \left[z - z_S \left(t - \frac{R(t)}{c} \right) \right]^2 \quad (1.37)$$

avec $t_e = t - \frac{R(t)}{c}$, c étant la célérité du son.

Puisque le déplacement de S est rectiligne uniquement suivant l'axe \vec{x} , on peut se ramener ici à un problème plan et ainsi poser $y_S = z_S = 0$. L'équation (1.37) devient :

$$R^2(t) = \left[x - v \cdot \left(t - \frac{R(t)}{c} \right) \right]^2 + r^2 \quad (1.38)$$

avec $r^2 = y^2 + z^2$.

Dans le cas d'ondes subsoniques, c'est-à-dire lorsque le nombre de Mach $M = \frac{v}{c}$ est inférieur à 1, l'unique solution de cette équation du second degré est :

$$R(t) = \frac{\sqrt{(x - vt)^2 + (1 - M^2)r^2}}{1 - M \cos \theta(t)} \quad (1.39)$$

où θ est l'angle formé par la direction \vec{OS} et l'axe \vec{x} .

1.2.3.1.2 Champ de pression d'une source en mouvement

Afin de calculer l'impact du mouvement de la source sur le champ de pression capté au niveau de l'observateur O , considérons une source acoustique ponctuelle, monopolaire et mobile. Soit $q(t)$ son débit massique instantané. On peut exprimer la densité de source par une distribution :

$$Q(x, y, z, t) = q(t)\delta(x - vt)\delta(y)\delta(z) \quad \text{avec } \delta(x - x_0) = \begin{cases} \infty & \text{si } x = x_0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

et ainsi caractériser la propagation des ondes acoustiques en présence de sources par l'équation d'Helmholtz inhomogène :

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\frac{\partial}{\partial t} [q(t)\delta(x - vt)\delta(y)\delta(z)] \quad (1.40)$$

À partir de l'équation (1.40) on peut montrer que le champ de pression vérifiant cette équation est de la forme [Morse et Ingard 1992] :

$$p(t) = \frac{1}{4\pi} \frac{\dot{q}(t - R/c)}{R(1 - M \cos \theta)^2} + \frac{q(t - R/c)}{4\pi} \frac{(\cos \theta - M)v}{R^2(1 - M \cos \theta)^3} \quad (1.41)$$

Camier et al. ont proposé un développement dans le cas général d'une trajectoire quelconque et d'une vitesse variable, parvenant à une équation à deux termes équivalente à l'équation (1.41) dans le cas d'un mouvement rectiligne et uniforme [Camier et al. 2012]. Ils ont étudié les contributions des deux termes de cette équation par des simulations faisant varier les paramètres de distance source-antenne, la fréquence d'émission de la source ainsi que sa vitesse. Ils ont ainsi montré que le second terme est généralement négligeable, la différence entre les deux contributions étant de l'ordre de 70 dB. En effet, il s'agit d'un terme de champ proche qui s'atténue rapidement en champ lointain (variation en $1/R^2$). Dans la suite, nous négligerons donc le second membre :

$$p(t) \approx \frac{1}{4\pi} \frac{\dot{q}(t - R/c)}{R(1 - M \cos \theta)^2} \quad (1.42)$$

D'après Morse et Ingard [Morse et Ingard 1992], en se plaçant dans le cas d'une source monochromatique telle que $q(t) = q_0 \sin(\omega_0 t)$, la phase instantanée du champ de pression donné par (1.42) est égale à :

$$\Phi(t) = \omega_0 \left(t - \frac{R}{c} \right)$$

On peut alors remonter à la fréquence instantanée du signal reçu, la dérivée temporelle de la phase instantanée de $p(t)$:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\omega_0}{2\pi} \left(1 - \frac{1}{c} \frac{dR}{dt} \right) = \frac{\omega_0}{2\pi} \left(1 + \frac{M \cos \theta}{1 - M \cos \theta} \right) = \frac{f_0}{1 - M \cos \theta} \quad (1.43)$$

avec f_0 la fréquence de l'onde émise par la source S .

1.2.3.1.3 Principaux effets du mouvement de la source

Les effets du mouvement relatif entre une source acoustique et un récepteur se traduisent par des coefficients affectant l'amplitude et la fréquence du signal reçu.

— Au niveau de l'amplitude : convection

Le dénominateur du terme rayonnant de l'équation (1.42) introduit un effet de convection qui agit sur l'amplitude du signal reçu : celui-ci est amplifié lorsque la source se rapproche du récepteur, et atténué lorsqu'il s'en éloigne, relativement à une source immobile située à la même abscisse. Le coefficient de convection est :

$$\frac{1}{(1 - M \cos \theta)^2}$$

— Au niveau des fréquences : effet Doppler

En (1.43) on a exprimé la fréquence instantanée f perçue par l'observateur par rapport à la fréquence f_0 émise par la source. Cette expression traduit un effet de compression-dilatation temporelle du signal de pression reçu par rapport à la pression émise. Cela se répercute de manière duale dans l'espace fréquentiel. Le coefficient Doppler est défini par le rapport des deux fréquences :

$$Df = \frac{f}{f_0} = \frac{1}{1 - M \cos \theta} \quad (1.44)$$

On constate que ces deux effets se trouvent renforcés par une vitesse plus élevée (fig. 1.17) : l'écart d'amplitude du signal reçu est d'autant plus grand (fig. 1.17a) tandis que le glissement fréquentiel observé occupe un intervalle de fréquence plus étendu (fig. 1.17b). De plus, la pente entre les valeurs extrêmes des coefficients est d'autant plus grande, c'est-à-dire que le changement est d'autant plus rapide, que la distance entre l'axe de déplacement de la source et l'observateur est petite (fig. 1.17).

1.2.3.1.4 Suivi de sources et dédopplérisation

L'antenne linéaire est composée d'un ensemble de N_M capteurs. Lors du déplacement de la source, le signal reçu par chaque capteur est affecté des altérations en fréquence et en amplitude décrites plus haut, mais avec un décalage temporel spécifique à chacun, en fonction de sa position

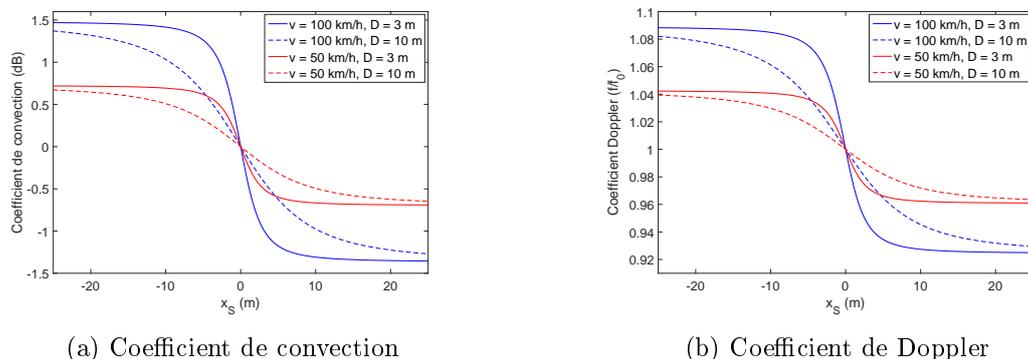


FIGURE 1.17 – Effet du mouvement relatif entre une source et un observateur sur le signal reçu par l'observateur. Distance source-trajectoire : $D = 3$ m.

dans le plan relativement à la source. En particulier, à un instant donné, certains microphones peuvent voir la source s'approcher tandis que d'autres la voient s'éloigner. Si l'on considère un point de focalisation fixe pour un traitement de type formation de voies, le signal focalisé à partir des signaux dopplérisés conduit à une reconstruction dégradée du signal source. Pour résoudre ce problème, il convient de *dédopplériser* les signaux en "suivant" la source, c'est-à-dire en focalisant sur la source et en déplaçant ce point focal en même temps que la source pendant toute la durée d'observation. Le problème est illustré par la figure 1.18.

Concrètement, il s'agit de calculer les retards et atténuations entre l'émission par la source et la réception par chaque microphone, pour chaque instant. Cette technique, bien que très efficace, peut s'avérer coûteuse en temps de calcul : la discrétisation temporelle des signaux échantillonnés implique que le temps de calcul global est d'autant plus long que la fréquence d'échantillonnage est élevée (celle-ci devant être suffisamment grande pour traiter toutes les fréquences d'intérêt). Elle nécessite de plus une connaissance précise de la cinématique de la source.

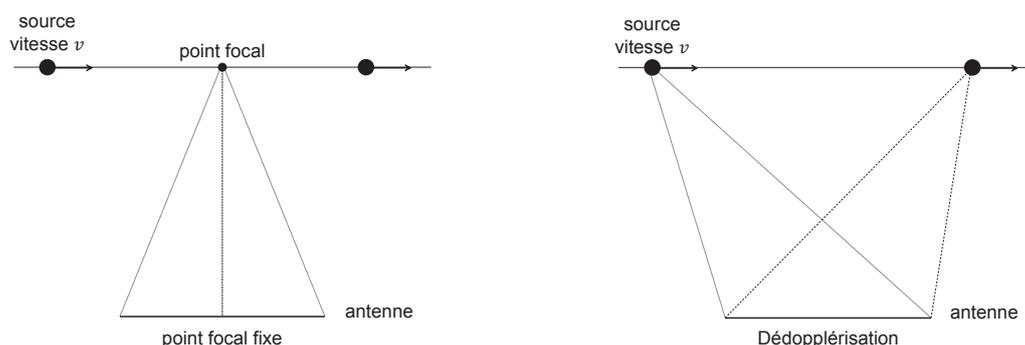


FIGURE 1.18 – Principe du traitement avec point focal fixe ou avec dédopplérisation. [Pallas 2002]

En pratique, on suit la source sur un intervalle spatial restreint, pour éviter une dégradation de la réponse d'antenne due à une trop grande ouverture d'antenne (c'est-à-dire focaliser à de trop grands angles, voir section 1.2.2.3). Le calcul de la formation de voies avec suivi de sources

s'écrit alors avec des termes correctifs par rapport à l'expression (1.5) :

$$b(t, F) = \frac{1}{K_F(t)} \sum_{m=0}^{N_M-1} w_m \frac{p_m \left(t + \frac{r_{Fm}(t)}{c} \right)}{r_{Fm}(t)(1 - M \cos \theta_{Fm}(t))^2}, \quad (1.45)$$

où les w_m sont les coefficients de pondération et $K_F(t)$ est le terme de normalisation suivant :

$$K_F(t) = \sum_{m=0}^{N_M-1} \frac{w_m}{[r_{Fm}(t)(1 - M \cos \theta_{Fm}(t))^2]^2} \quad (1.46)$$

Bien que la méthode puisse être chronophage, le gain apporté par le suivi de sources est néanmoins indéniable pour traiter des sources mobiles. On peut voir une comparaison de résultats de formation de voies avec et sans suivi de sources dans le cas d'une source mobile tonale, à différentes vitesses dans la figure 1.19.

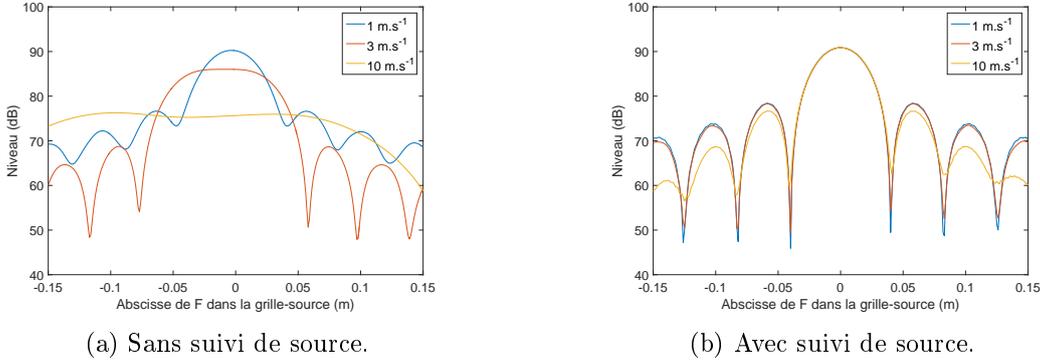


FIGURE 1.19 – Formation de voies d'une source mobile sans et avec suivi de source, à différentes vitesses. Antenne linéaire (30 microphones, espace intercapteurs 2 cm) parallèle à l'axe de déplacement de la source et centrée en $x = 0$, distance antenne-axe de déplacement de la source 50 cm, fréquence 6 kHz.

Le coût en temps de calcul de cette méthode est principalement dû à l'interpolation nécessaire pour calculer les signaux microphoniques retardés : en effet, si la base de temps d'émission est généralement échantillonnée régulièrement, les instants de réception associés à cette base ne le sont pas forcément, par construction. La dédopplérisation s'effectue donc en interpolant les signaux microphoniques sur la base de temps de réception. Or, le choix de la méthode d'interpolation n'est pas triviale. L'objet n'est pas d'en faire l'étude ici, ce sujet est par exemple traité dans le cadre spécifique de la dédopplérisation de signaux par Graham [Graham 2018]. On peut citer comme méthodes répandues l'interpolation linéaire, polynomiale ou encore par fonctions spline, par ordre croissant de complexité. L'interpolation spline procure de meilleurs résultats à paramètres égaux, mais requiert également un temps de calcul plus long. Le paramètre principal intervenant sur la qualité de l'interpolation est la fréquence d'échantillonnage : la méthode spline permet d'utiliser presque entièrement la plage de fréquence allant jusqu'à la fréquence de Nyquist, tandis que la méthode linéaire nécessite un sur-échantillonnage conséquent pour obtenir des résultats comparables. Le choix de la méthode d'interpolation résulte donc d'un

compromis entre fréquence d'échantillonnage disponible pour les mesures, précision souhaitée et temps de calcul.

1.2.3.2 Déconvolution de sources mobiles – Adaptation de la PSF

Alors qu'on peut trouver de nombreux exemples de déconvolution pour des sources fixes, le cas des sources mobiles est moins souvent et plus récemment abordé. La raison en est que la PSF, élément essentiel pour poser le problème de la déconvolution, ne peut être directement calculée, la relation entre source et émetteur n'étant plus temporellement invariante. Guérin et Weckmüller proposent tout d'abord d'adapter le calcul de la PSF dans le cas mobile, en prenant en compte le glissement en fréquence provoqué par l'effet Doppler [Guérin et Weckmüller 2008].

En prenant le cas d'une source monopolaire harmonique de fréquence f_S , on peut définir le *rapport de Doppler* sur un capteur comme étant le rapport entre les coefficients Doppler (comme définis dans Eq. (1.44) de cette source Df_S et d'une source qui serait située sur le point focal F de la formation de voies Df_F . En effet, dans la formation de voies avec suivi de source, on ne dédopplérise correctement qu'un signal provenant d'une source S située au point focal F considéré ($\frac{Df_F}{Df_S} = 1 \forall t$). Dans le cas contraire ($F \neq S$), le signal est mal dédopplérisé ($\frac{Df_F}{Df_S} \neq 1$ et varie avec t). Le tracé de ce *rapport de Doppler* indique une forte variation de celui-ci en fonction de l'angle de focalisation : on peut en conclure que la PSF sera d'autant mieux approximée par une PSF invariante sur l'intervalle de suivi que l'ouverture de suivi, c'est-à-dire l'écart angulaire entre le début du suivi de source et la fin, sera courte [Guérin et Weckmüller 2008].

Les auteurs proposent dans un premier temps une fonction coût à minimiser pour le problème statique, similaire à celle introduite avec l'équation (1.28) :

$$\text{pour chaque fréquence } f, \quad C(\mathbf{S}) = \sum_{i=1}^{N_F} \left(\sum_{j=1}^{N_S} H_{ij} S_j - B_i \right)^2 \quad \text{et } S_j \geq 0 \quad (1.47)$$

avec \mathbf{S} le vecteur des puissances d'un ensemble N_S de monopoles décorrélés qui représente la région source, \mathbf{B} étant le vecteur des puissances des sorties de formation de voies pour tous les points de focalisation F et de taille N_F , et $\tilde{\mathbf{H}}$ la matrice des PSF. Les indices i et j représentent respectivement l'ensemble des points de focalisation de la formation de voies, et l'ensemble des sources monopolaires.

Cette équation étant dans le domaine fréquentiel, elle doit être résolue pour chaque fréquence. Les sources monopolaires sont supposées décorrélées et les auteurs supposent également que $\tilde{\mathbf{H}}$ est carrée ($N_F = N_S$). Dans le cas mobile, à cause du glissement fréquentiel des lobes secondaires de la formation de voies, ils introduisent une intégration sur une bande de fréquences dans ce problème. Dans le cas d'une discrétisation à la fois spatiale et fréquentielle, en supposant que les composantes des différentes sources sont décorrélées spatialement et fréquentiellement, on peut écrire :

$$B_i(f_F) = \sum_{f_S=f_{min}}^{f_{max}} \sum_{j=1}^{N_S} \tilde{H}_{ij}(f_S, f_F) S_j(f_S) \quad \text{où } f_S, f_F \in [f_{min}; f_{max}] \quad (1.48)$$

avec

$$\tilde{H}_{ij}(f_S, f_F) = \begin{cases} 0 & \text{si } f_S \frac{Df_S}{Df_F} \notin \left[f_F - \frac{\Delta f_{\text{ech}}}{2}; f_F + \frac{\Delta f_{\text{ech}}}{2} \right] \\ H_{ij}(f_S, f_F) & \text{si } f_S \frac{Df_S}{Df_F} \in \left[f_F - \frac{\Delta f_{\text{ech}}}{2}; f_F + \frac{\Delta f_{\text{ech}}}{2} \right] \end{cases}$$

où Δf_{ech} est la largeur de bande fréquentielle discrétisée et f_{\min} et f_{\max} délimitent l'intervalle fréquentiel d'intégration. Dans ces conditions, la fonction coût (1.47) devient :

$$C(\mathbf{S}) = \sum_{f_F=f_{\min}}^{f_{\max}} \sum_{i=1}^{N_S} \left(\sum_{f_S=f_{\min}}^{f_{\max}} \sum_{j=1}^{N_S} \tilde{H}_{ij}(f_S, f_F) S_j(f_S) - B_i(f_F) \right)^2 \quad \text{et } S_j \geq 0 \quad (1.49)$$

Enfin, les auteurs approximent la PSF pour une source S localisée au point d'indice j et une antenne focalisée sur un point F d'indice i avec cette expression :

$$H_{ij}(f_S, f_F) = \left| \sum_{m=1}^{N_M} w_m \frac{r_{Fm}}{r_{Sm}} e^{jkDf_{Sm}(r_{Fm}-r_{Sm})} \right|^2 \quad \text{avec } k = 2\pi \frac{f}{c} \quad (1.50)$$

où l'on rappelle que les distances r_{Fm} et r_{Sm} varient avec le temps : il est nécessaire de choisir une valeur pour le calcul, choix qui n'est pas discuté par les auteurs. On peut par exemple choisir leur valeur correspondant au milieu de l'intervalle de suivi.

Cette méthode commence à adapter la déconvolution au cas des sources mobiles, en adoptant une approche hybride entre une formation de voies en temporel avec suivi de sources, et une déconvolution dans le domaine fréquentiel. Une adaptation du calcul de la PSF est proposée, avec cependant la nécessité de considérer une intégration en fréquence pour traiter le problème d'étalement spectral dû à l'effet Doppler. Cette intégration se fait sur une bande de fréquences que l'on peut définir (entre f_{\min} et f_{\max}), et que l'on fait généralement correspondre à l'amplitude du glissement fréquentiel des lobes secondaires du signal dédopplérisé. Ainsi, plus celui-ci est important, plus il est nécessaire de considérer une large bande de fréquences. Cette méthode, développée par le DLR (Institute of Propulsion Technology), a été utilisée pendant plusieurs années pour caractériser les sources aéroacoustiques sur des avions (par exemple dans [Siller 2012]).

1.2.3.3 Méthodes par découpage temporel du mouvement et MSA-PSF

Comme précisé dans le paragraphe précédent, la méthode proposée par Guérin et Weckmüller [Guérin et Weckmüller 2008] n'est pas totalement satisfaisante. De plus, afin de réduire les temps de calcul, Guérin et Weckmüller ainsi que Brusniak et al. [Brusniak et al. 2006] font l'hypothèse, similaire à celle faite pour DAMAS2 [Dougherty 2005], d'une invariance de la PSF dans l'espace. L'algorithme de déconvolution CLEAN est également utilisé dans ce cadre par Böhning et Siller [Böhning et Siller 2007]. Dans tous ces cas, il s'agit d'une approche hybride entre domaine temporel pour la réalisation de la formation de voies (avec suivi de source), et domaine fréquentiel pour la déconvolution.

Fleury et Bulté proposent une méthode pour étendre totalement l'utilisation de la déconvolution au cas des sources mobiles [Fleury et Bulté 2011]. Sous certaines hypothèses détaillées plus loin, ils choisissent une approche purement dans le domaine fréquentiel afin de limiter les ressources de calcul nécessaires. L'idée est d'effectuer le traitement sur une succession d'intervalles de temps (appelés "blocs" ou "snapshots"), suffisamment courts pour considérer les variations des variables cinématiques comme négligeables sur chacun des intervalles et pouvoir ainsi utiliser la formation de voies fréquentielle snapshot par snapshot. Cette approche a été appliquée dans le domaine aéronautique par ses auteurs et également au milieu marin par Oudompheng [Oudompheng 2015] ou encore Lamotte et al. [Lamotte et al. 2016]. Dans la mesure où aucun nom ne lui a été donné dans ces publications, nous avons choisi, par commodité, de l'appeler MSA-PSF pour "Moving source adapted point spread function", nom qui sera repris dans la suite de ce mémoire.

1.2.3.3.1 Formulation du problème

Le modèle acoustique associé au signal reçu par le microphone m ($m = 1 \dots N_M$) est la superposition des signaux provenant des différentes sources, caractérisées par leur position i et par leur contribution aux fréquences ω_p dans le spectre considéré :

$$p_m^{(model)}(t, \alpha) = \sum_{p=1}^{N_f} \sum_{i=1}^{N_S} \alpha_i(\omega_p) G_{im}(t, \omega_p) \quad (1.51)$$

où $p_m(t)$ est le signal mesuré par le microphone m , $p_m^{(model)}$ venant du modèle. N_f est le nombre de fréquences considérées, N_S le nombre de point-sources sur la grille, $\alpha_i(\omega_p)$ est l'amplitude complexe de la source i à la fréquence ω_p et $G_{im}(t, \omega_p)$ est la fonction reliant l'amplitude de la source située à la position i sur la grille et le signal temporel reçu sur le capteur m , pour la fréquence émise ω_p .

On cherche à minimiser $\|\mathbf{p}(t) - \mathbf{p}^{(model)}(t, \alpha)\|$ sur la quantité α , $\mathbf{p}(t)$ étant le vecteur des pressions mesurées par les microphones. Au lieu de traiter le problème d'optimisation dans le domaine fréquentiel et de chercher les densités spectrales de puissance des sources à identifier comme c'est le cas pour la déconvolution de sources fixes, on fait ici l'optimisation dans le domaine temporel et on cherche l'expression de la pression mesurée $\mathbf{p}(t)$. Un tel α vérifie :

$$\langle \mathbf{p}^{(model)}(t, \beta) | \mathbf{p}(t) - \mathbf{p}^{(model)}(t, \alpha) \rangle = 0 \quad \forall \beta \in \mathbb{C}^{N_S} \quad (1.52)$$

où $\langle \cdot | \cdot \rangle$ dénote le produit scalaire matriciel associé à la norme de Frobenius. Pour deux matrices $\bar{\mathbf{A}}$ et $\bar{\mathbf{B}}$, $\langle \bar{\mathbf{A}} | \bar{\mathbf{B}} \rangle = \text{tr}(\bar{\mathbf{A}}^H \bar{\mathbf{B}})$, et pour deux fonctions vectorielles $\mathbf{a}(t)$ et $\mathbf{b}(t)$ de longueur N_M :

$$\langle \mathbf{a}(t) | \mathbf{b}(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_{\mathcal{T}} \sum_{m=1}^{N_M} a_m^*(t) b_m(t) dt \quad (1.53)$$

où T est la longueur du support \mathcal{T} .

Dans cette méthode, les auteurs formulent des hypothèses qui sont listées ci-dessous en préambule :

1. La source étendue est discrétisée en N_S points-source, monopôles dont les amplitudes sont des variables aléatoires décorrélées (spatialement et fréquentiellement), en mouvement linéaire uniforme.
2. Les moyennes statistiques sont approximées par des moyennes sur un nombre fini N_K de réalisations de l'expérience.
3. L'analyse se fait sur une durée d'émission courte, notée $T^{(e)}$ et centrée sur $t_0^{(e)}$, de sorte que le déplacement de la source reste petit devant la distance source-antenne D , ce qui se traduit par $vT^{(e)} \ll D$, v étant la vitesse de déplacement des sources.
4. Sous l'hypothèse précédente, la distance R_{im} et l'angle θ_{im} entre le point de la grille i et le capteur m de l'antenne sont constants pendant l'intervalle d'observation et sont évalués à l'instant d'émission $t_0^{(e)}$: $R_{im} \approx R_{im,0}$ et $\theta_{im} \approx \theta_{im,0}$.
5. Sous l'hypothèse 3, la fréquence instantanée du signal émis au point de la grille i et reçu par le capteur m peut être considérée comme constante et égale à la fréquence dopplérisée du signal reçu pour une émission à l'instant $t_0^{(e)}$: $\omega_{p_{im,0}} = \frac{\omega_p}{1-M_{im,0}}$, où $M_{im,0} = M \cos(\theta_{im,0})$.
6. Le rapport des fréquences dopplérisées reçues sur le capteur m en provenance de deux points de la grille-source i et j reste inférieur au pas d'échantillonnage fréquentiel. On peut ainsi faire l'approximation $\omega_p \frac{1-M_{jm,0}}{1-M_{im,0}} \approx \omega_p$, $\forall i, j, m$.
7. Les amplitudes des sources sont des variables ergodiques.

1.2.3.3.2 Mise en équation

À partir de l'équation (1.52), on cherche à se ramener à une équation matricielle. Dans le cas de sources aléatoires, l'hypothèse 1 se traduit par :

$$E\{\alpha_i(\omega_p)\alpha_j^*(\omega_q)\} = E\{|\alpha_i(\omega_p)|^2\}\delta_{ij}\delta_{pq} \quad (1.54)$$

où δ_{ij} est le symbole de Kronecker défini par :

$$\begin{cases} \delta_{ij} = 1 & \text{si } i = j \\ \delta_{ij} = 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

À partir de l'équation (1.54) et sous l'hypothèse 2, on peut écrire les puissances élémentaires S_j des sources ainsi :

$$S_j = \frac{1}{N_K} \sum_{k=1}^{N_K} |\alpha_j^{(k)}|^2 = \overline{|\alpha_j^{(k)}|^2} \quad (1.55)$$

N_K étant le nombre de réalisations sur lesquelles la moyenne d'ensemble statistique est approximée par une moyenne finie. En injectant le modèle acoustique (1.51) dans (1.52) et en considérant la puissance des sources, on obtient après développement l'équation normale [Fleury et Bulté 2011] :

$$\sum_{q=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_S} H_{ij}(\omega_p, \omega_q) S_j(\omega_q) = B_i(\omega_p) \quad (1.56)$$

avec les éléments des PSF

$$H_{ij}(\omega_p, \omega_q) = \left| \frac{1}{T} \int_{\mathcal{T}} \sum_{m=1}^{N_M} G_{im}^*(t, \omega_p) G_{jm}(t, \omega_q) dt \right|^2 \quad (1.57)$$

et la sortie de formation de voies

$$B_i(\omega_p) = \frac{1}{T^2} \iint_{\mathcal{T}^2} \sum_{m,n=1}^{N_M} G_{im}^*(t_1, \omega_p) C_{mn}(t_1, t_2) G_{in}(t_2, \omega_p) dt_1 dt_2 \quad (1.58)$$

où

$$C_{mn}(t_1, t_2) = \overline{p_m^{(k)}(t_1) [p_n^{(k)}(t_2)]^*}$$

On note ici que $C_{m,n}$ est une fonction d'intercorrélacion de deux variables aléatoires p_m et p_n prises à deux instants différents. L'intercorrélacion est ici calculée sur N_k réalisations de ces deux variables aléatoires.

Il faut également ajouter une contrainte de positivité de la puissance des sources : $S_j(\omega_q) \geq 0 \quad \forall j \in \llbracket 1, N_S \rrbracket$.

1.2.3.3.3 Expressions des termes de l'équation pour des sources monopolaires

Sous l'hypothèse 1, l'équation (1.42) donne la pression reçue par un capteur à l'instant t :

$$p(t) = \frac{1}{4\pi R(1 - M \cos \theta)^2} \dot{q}(t - R/c) \quad (1.59)$$

Considérons une source monochromatique s'écrivant $q(t) = a_p e^{j\omega_p t}$, où a_p est une variable aléatoire. En remplaçant $q(t)$ par l'expression dans (1.59), on obtient :

$$p(t) = \frac{j\omega_p a_p}{4\pi R(1 - M \cos \theta)^2} e^{j\omega_p(t - \frac{R}{c})} = \frac{\alpha(\omega_p)}{R(1 - M \cos \theta)^2} e^{j\omega_p(t - \frac{R}{c})} \quad (1.60)$$

avec $\alpha(\omega_p) = \frac{j\omega_p a_p}{4\pi}$ qui correspond à l'amplitude complexe de la pression à 1 m de la source fixe. On peut donc identifier par analogie la fonction $G_{im}(t, \omega_p)$ dans le modèle acoustique (1.51) :

$$G_{im}(t, \omega_p) = \frac{1}{R_{im}(1 - M \cos \theta_{im})^2} e^{j\omega_p(t - \frac{R_{im}}{c})} \quad (1.61)$$

En utilisant l'hypothèse 4, il vient :

$$G_{im}(t, \omega_p) = \frac{1}{R_{im,0}(1 - M_{im,0})^2} e^{j\omega_p(t - \frac{R_{im}}{c})} = \frac{1}{R_{im,0}(1 - M_{im,0})^2} e^{j\phi_{im}(t)} \quad (1.62)$$

où $\phi_{im}(t)$ est la phase instantanée sur le capteur m du signal venant du point de la grille i . Sous l'hypothèse 5, cette phase instantanée varie linéairement, on peut donc faire l'approximation suivante :

$$\phi_{im}(t) = \omega_p \left(t - \frac{R_{im}}{c} \right) \approx \omega_{p_{im,0}} t + \phi_{im,0} \quad (1.63)$$

Les valeurs des paramètres cinématiques étant évalués à l'instant $t_0^{(e)}$, il est nécessaire de choisir $\phi_{im,0}$ de manière à ce que la phase linéarisée du signal reçu soit égale à la phase exacte du signal émis à cet instant :

$$\omega_p t_0^{(e)} = \omega_{p_{im,0}} \left(t_0^{(e)} + \frac{R_{im,0}}{c} \right) + \phi_{im,0} \quad (1.64)$$

or, comme indiqué dans l'hypothèse 5, la fréquence dopplérisée est $\omega_{p_{im,0}} = \frac{\omega_p}{1-M_{im,0}}$, on trouve donc :

$$\phi_{im,0} = -\omega_{p_{im,0}} t_0^{(e)} M_{im,0} - \omega_{p_{im,0}} \frac{R_{im,0}}{c} \quad (1.65)$$

On peut donc compléter l'expression approchée de la phase instantanée dans (1.63) grâce à (1.65), puis substituer cette expression dans (1.62) :

$$G_{im}(t, \omega_p) \approx \tilde{G}_{im}(\omega_{p_{im,0}}) e^{j\omega_{p_{im,0}} t} \quad (1.66)$$

où

$$\tilde{G}_{im}(\omega_{p_{im,0}}) = \frac{1}{R_{im,0}(1-M_{im,0})^2} e^{-j\omega_{p_{im,0}} \frac{R_{im,0}}{c}} e^{-j\omega_{p_{im,0}} t_0^{(e)} M_{im,0}} \quad (1.67)$$

On constate une différence entre le résultat obtenu par ce développement et l'expression utilisée dans [Fleury et Bulté 2011] pour $\tilde{G}_{im}(\omega_{p_{im,0}})$. Un terme supplémentaire faisant intervenir $t_0^{(e)}$ est en effet présent dans (1.67) par rapport à la référence. Cela implique que l'instant a été implicitement choisi par les auteurs tel que $t_0(e) = 0$. Les développements suivants conserveront l'expression présentée ici.

Le terme de formation de voies

En substituant $G_{im}(t, \omega)$ dans (1.58) par son expression (1.66), il vient :

$$B_i(\omega_p) \approx \sum_{m,n=1}^{N_M} \tilde{G}_{im}^*(\omega_{p_{im,0}}) \Gamma_{imn}(\omega_p) \tilde{G}_{in}(\omega_{p_{in,0}}) \quad (1.68)$$

avec

$$\Gamma_{imn}(\omega_p) = \frac{1}{T^2} \iint_{\mathcal{T}^2} e^{-j\omega_{p_{im,0}} t_1} C_{mn}(t_1, t_2) e^{j\omega_{p_{in,0}} t_2} dt_1 dt_2$$

$\bar{\Gamma}$ est la matrice interspectrale qu'on peut calculer de manière plus aisée en moyennant sur N_K réalisations le produit des transformées de Fourier des signaux reçus sur les capteurs calculées aux fréquences dopplérisées, respectivement pour le capteur m et pour le capteur n relativement au point focal i :

$$\Gamma_{imn}(\omega_p) = \overline{\hat{p}_m^{(k)}(\omega_{p_{im,0}}) \left[\hat{p}_n^{(k)}(\omega_{p_{in,0}}) \right]^*} \quad (1.69)$$

Cette formation de voies utilise un principe de pondération conforme à l'approche optimale décrite par les équations (1.14) et (1.15), au terme de normalisation près.

Fonction d'étalement du point (PSF)

En utilisant l'expression de la fonction de $G_{im}(t, \omega)$, donnée par (1.66), dans l'expression de la PSF, celle-ci devient :

$$H_{ij}(\omega_p, \omega_q) \approx \left| \sum_{m=1}^{N_M} \tilde{G}_{im}^*(\omega_{p_{im,0}}) \tilde{G}_{jm}(\omega_{q_{jm,0}}) I_{ijm}(\omega_p, \omega_q) \right|^2 \quad (1.70)$$

où

$$I_{ijm}(\omega_p, \omega_q) = \frac{1}{T} \int_{\mathcal{T}} e^{-j\Delta_{ijm}(\omega_p, \omega_q)t} dt$$

et

$$\Delta_{ijm}(\omega_p, \omega_q) = \omega_{p_{im,0}} - \omega_{q_{jm,0}}$$

Le terme I_{ijm} vaut 1 lorsque la différence Δ_{ijm} est nulle. Dans le cas contraire, Fleury et Bulté indiquent qu'il est de l'ordre de M et négligeable dans le cadre de leur étude, approximant le terme $I_{ijm} \approx \delta(\Delta_{ijm}(\omega_p, \omega_q))$. Dans un cas plus général, cette approximation devient valable en formulant l'hypothèse 6, devenant discutable pour des couples (i, j) de points très éloignés sur la grille-source. Sous cette hypothèse, l'expression de la PSF devient :

$$H_{ij}(\omega_p, \omega_q) \approx \left| \sum_{m=1}^{N_M} \tilde{G}_{im}^*(\omega_{p_{im,0}}) \tilde{G}_{jm}(\omega_{q_{jm,0}}) \delta(\Delta_{ijm}(\omega_p, \omega_q)) \right|^2 \quad (1.71)$$

L'erreur commise serait alors de l'ordre de M^2 , donc négligeable.

Équation normale

En remplaçant cette dernière expression de H_{ij} dans l'équation (1.56), on obtient :

$$\sum_{q=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_S} \left| \sum_{m=1}^{N_M} \tilde{G}_{im}^*(\omega_{p_{im,0}}) \tilde{G}_{jm}(\omega_{q_{jm,0}}) \delta(\Delta_{ijm}(\omega_p, \omega_q)) \right|^2 S_j(\omega_q) \approx B_i(\omega_p) \quad (1.72)$$

or, le terme de gauche est non nul uniquement pour $\Delta_{ijm}(\omega_p, \omega_q) = 0$, soit pour $\omega_q = \omega_p \frac{1-M_{jm,0}}{1-M_{im,0}}$. Cette équation devient :

$$\sum_{j=1}^{N_S} \left| \sum_{m=1}^{N_M} \tilde{G}_{im}^*(\omega_{p_{im,0}}) \tilde{G}_{jm}(\omega_{p_{im,0}}) \right|^2 S_j \left(\omega_p \frac{1-M_{jm,0}}{1-M_{im,0}} \right) \approx B_i(\omega_p) \quad (1.73)$$

Sous l'hypothèse 3 qui stipule que le déplacement des sources dans l'intervalle de durée $T^{(e)}$ est négligeable devant la distance source-antenne, on peut faire l'approximation suivante :

$$S_j \left(\omega_p \frac{1-M_{jm,0}}{1-M_{im,0}} \right) = S_j(\omega_p)$$

Ainsi, on peut écrire l'équation (1.73) sous la forme matricielle :

$$\bar{\bar{\mathbf{H}}}(\omega_p)\mathbf{S}(\omega_p) = \mathbf{B}(\omega_p) \quad (1.74)$$

où les éléments du vecteur $\mathbf{B}(\omega_p)$ sont donnés par (1.68) et les éléments de la matrice $\bar{\bar{\mathbf{H}}}(\omega_p)$ par :

$$\tilde{H}_{ij}(\omega_p) = \left| \sum_{m=1}^{N_M} \tilde{G}_{im}^*(\omega_{p_{im,0}}) \tilde{G}_{jm}(\omega_{p_{im,0}}) \right|^2$$

Formulation moyennée en temps

Les développements effectués jusqu'à présent concernaient l'étude d'un intervalle de temps unique au sein duquel on considérait des moyennes statistiques d'ensemble sur un nombre fini de réalisations N_K . Cela sous-entend que l'on est capable d'obtenir plusieurs réalisations des variables aléatoires, c'est-à-dire des signaux des sources, dans les conditions d'un bruit au passage – quel que soit le contexte, aérien, routier, maritime, etc. Or dans ce genre de situations, il est en pratique impossible de reproduire à l'identique un passage d'un véhicule, on ne dispose par conséquent que d'un seul passage. Il faut donc utiliser des moyennes temporelles, sous l'hypothèse 7 d'ergodicité des variables aléatoires.

Le nombre de réalisations précédemment utilisé N_K se traduit désormais comme un nombre d'intervalles temporels : on segmente le temps d'émission centré sur $t_0^{(e)}$ en un nombre fini d'intervalles, appelés "blocs" ou "snapshots", qui ont chacun une durée $T^{(e)}$ et qui peuvent se recouvrir. L'évaluation du terme de formation de voies donnée par (1.68) fait intervenir une moyenne d'ensemble, qui doit donc être exprimée comme une moyenne temporelle sur l'ensemble des snapshots :

$$B_i(\omega_p) \approx \sum_{m,n=1}^{N_M} \overline{\tilde{G}_{im}^{(k)*}(\omega_{p_{im,0}}^{(k)}) \Gamma_{imn}^{(k)}(\omega_p) \tilde{G}_{in}^{(k)}(\omega_{p_{in,0}}^{(k)})} \quad (1.75)$$

où les fonctions $\tilde{G}^{(k)}$ et les fréquences $\omega^{(k)}$ sont évaluées au temps d'émission correspondant au centre du $k^{\text{ème}}$ snapshot. On précise également que les termes de la matrice interspectrale sont donnés par :

$$\Gamma_{imn}^{(k)}(\omega_p) = \hat{p}_m^{(k)}(\omega_{p_{im,0}}^{(k)}) \hat{p}_n^{(k)*}(\omega_{p_{in,0}}^{(k)}) \quad (1.76)$$

De la même manière, on calcule une PSF moyennée sur N_K snapshots :

$$\tilde{H}_{ij}(\omega_p) = \overline{\left| \sum_{m=1}^{N_M} \tilde{G}_{im}^{(k)*}(\omega_{p_{im,0}}^{(k)}) \tilde{G}_{jm}^{(k)}(\omega_{p_{im,0}}^{(k)}) \right|^2} \quad (1.77)$$

Sur la base du modèle (1.74), la déconvolution est effectuée en résolvant un problème d'optimisation, en utilisant par exemple les approches classiques DAMAS, DAMAS2, CLEAN, CLEAN-SC, etc.

Une approche similaire a été proposée peu de temps avant l'étude de Fleury et Bulté par Camargo pour calculer la formation de voies en fréquentiel pour des sources mobiles [Camargo

2010]. Celle-ci est réalisée sur différents snapshots puis moyennée sur l'ensemble des blocs temporels. La manière de procéder pour dédopplériser est légèrement différente, avec une hypothèse de linéarité de la variation de fréquence dopplérisée. Le coefficient Doppler est déterminé au milieu du snapshot et supposé identique pour tous les capteurs de l'antenne. En revanche, contrairement à Fleury et Bulté, l'étude de Camargo ne propose pas d'implémenter la déconvolution suite à la formation de voies.

On peut comparer ici l'approche de Fleury et Bulté à celle proposée par Guérin et Weckmüller [Guérin et Weckmüller 2008], en mettant en parallèle les expressions de la matrice de transfert $\bar{\mathbf{H}}$ et du vecteur des sorties de formation de voies \mathbf{B} dans les deux cas. Guérin et Weckmüller utilisent un seul intervalle temporel et prennent en compte l'étalement fréquentiel total, en résolvant le problème d'optimisation de la déconvolution sur une PSF intégrée en fréquence : l'optimisation est multi-fréquentielle. De leur côté, Fleury et Bulté supposent que l'étalement fréquentiel est limité mais ils prennent en compte sa variation temporelle par découpage en sous-intervalles et en considérant une PSF moyenne et une sortie de formation de voies moyenne sur l'ensemble de ces sous-intervalles.

1.2.3.3.4 Application aux véhicules routiers

Cette approche est intéressante puisqu'elle propose de faire l'intégralité des calculs dans le domaine fréquentiel tout en tenant compte d'une évolution de la configuration au cours du temps. Cette démarche repose cependant sur une hypothèse forte de quasi-invariance au sein d'un même snapshot, qui devient une contrainte importante pour le choix de la durée des snapshots ainsi que de leur nombre. Par conséquent, on peut selon les cas soit avoir un grand nombre de snapshots, ce qui est souhaitable, soit au contraire être limité à cause de la courte durée totale du passage du véhicule.

De plus, si le calcul de la matrice interspectrale à la fréquence dopplérisée tel que présenté dans (1.69) peut se faire à l'aide d'un algorithme de type FFT (*Fast Fourier Transform*) avant de sélectionner la fréquence la plus proche de la fréquence dopplérisée, en pratique on a pu vérifier que cette manière de procéder n'est généralement pas suffisamment précise. En effet, l'écart entre la fréquence dopplérisée exacte et la fréquence discrétisée introduit des erreurs importantes dans le terme de formation de voies qui dégrade considérablement le résultat de l'optimisation. C'est le cas dans notre application aux véhicules routiers, et il est préférable de calculer la transformée de Fourier discrète des signaux mesurés à la fréquence dopplérisée précise, sans passer par un algorithme rapide. Si cela n'impacte pas outre mesure le temps de calcul lors d'une analyse à une seule fréquence, celui-ci augmente drastiquement lorsqu'on souhaite étudier une large bande de fréquences, ce qui constitue un désavantage.

Par ailleurs, certaines hypothèses sous-jacentes à la méthode sont difficilement vérifiées dans le cas expérimental sur véhicules routiers, en particulier les hypothèses 4 et 5 qui supposent que les paramètres cinématiques du véhicule de même que la fréquence instantanée du signal émis sont constants pendant la durée d'un snapshot. En effet, la faible distance entre antenne et axe de déplacement du véhicule dans le contexte routier implique des variations plus rapides de ces paramètres, comme illustré dans la figure 1.17 de la section 1.2.3.1.3. Par comparaison, l'étude numérique puis expérimentale de Fleury et Bulté concerne un avion se déplaçant à $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à une altitude de 100 m, tandis qu'un véhicule routier passe à une distance de l'ordre de 3 m

à des vitesses allant de 30 à 100 km.h⁻¹. Pour une vitesse de 50 km.h⁻¹, soit environ 14 m.s⁻¹, la vitesse de l'avion est 7 fois plus élevée tandis que la distance est 33 fois plus grande : les variations constatées par les auteurs sont par conséquent moins rapides que celles constatées dans le contexte routier.

Cette méthode reste néanmoins prometteuse pour l'identification de sources en mouvement, et a fait l'objet d'une étude de ses performances par simulations numériques avec des paramètres typiques du passage de véhicules routiers dans [Cousson et al. 2017]. Les résultats de cette étude sont présentés dans le deuxième chapitre de ce mémoire, dans lequel ils sont mis en comparaison avec une autre méthode, également testée selon les mêmes paramètres numériques. Elle sera dénommée MSA-PSF pour Moving Source Adapted PSF dans la suite.

En comparaison, l'approche de Guérin et Weckmüller n'intègre pas la variabilité de la configuration en considérant une disposition moyenne unique, tout en autorisant des étalements fréquentiels plus conséquents. La nouvelle approche que nous présenterons dans le deuxième chapitre permet à la fois une analyse multi-fréquentielle via une approche temporelle et la prise en compte de la variabilité temporelle par un suivi de source. La parcimonie apportée par la déconvolution chez Guérin et Weckmüller d'une part, et chez Fleury et Bulté d'autre part, est par ailleurs amenée par une approche heuristique.

1.3 Séparation de sources

Il est possible, pour compléter ou remplacer une méthode d'identification géométrique telle que la formation de voies, de tirer avantage de la connaissance d'information cohérente avec les signaux sources recherchés lorsque celle-ci est disponible. En effet, des techniques de filtrage par cohérence avec une référence connue peuvent permettre d'améliorer la séparation de sources décorrélatées géométriquement proches, là où les méthodes de formation de voies et de déconvolution trouvent leurs limites. La cohérence peut également être utilisée dans des méthodes ne faisant pas intervenir de référence. Dans cette partie, nous présenterons dans un premier temps les notions de traitement du signal concernant la cohérence nécessaires à la réalisation de ces types de procédés, avant de voir des exemples appliqués à l'acoustique. Ces applications peuvent être du domaine de l'imagerie acoustique, mais également relever de la séparation de contributions de sources sans produire d'image du système et de ses sources.

1.3.1 Fonction de cohérence et filtrage de signaux

De nombreuses notions de traitement du signal sont présentées par Bendat et Piersol dans un ouvrage de référence [Bendat et Piersol 1971] dans lequel on peut notamment trouver la définition de la fonction de cohérence entre signaux et ses propriétés. L'application de notions d'analyse spectrale et de corrélation à des cas pratiques est plus spécifiquement traitée par ces mêmes auteurs dans un autre ouvrage [Bendat 1980] d'où sont tirés les principaux résultats présentés dans cette partie.

1.3.1.1 Cas d'un système à entrée unique et sortie unique

La fonction de cohérence ordinaire entre deux signaux aléatoires $x(t)$ et $y(t)$ est une quantité à valeur réelle comprise entre 0 et 1 et définie par :

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|\Gamma_{xy}(f)|^2}{\Gamma_{xx}(f)\Gamma_{yy}(f)} \quad (1.78)$$

où $\Gamma_{xy}(f) = E\{\hat{x}(f)\hat{y}^*(f)\}$ (resp. $\Gamma_{xx}(f)$ et $\Gamma_{yy}(f)$) est l'interspectre entre $x(t)$ et $y(t)$ (resp. l'autospectre de $x(t)$ et de $y(t)$) à la fréquence f .

La cohérence s'interprète comme une mesure de la linéarité de la transformation entre $x(t)$ et $y(t)$. Aux valeurs extrêmes, le cas où $\gamma_{xy}^2(f)$ vaut 1 quel que soit f correspond à un système linéaire parfait, c'est-à-dire que l'on peut exprimer la sortie $y(t)$ du système par une transformation linéaire de l'entrée $x(t)$. *A contrario*, si $\gamma_{xy}^2(f)$ est nulle quel que soit f , cela signifie que $x(t)$ et $y(t)$ sont totalement décorrélés (leur interspectre est nul donc la cohérence l'est aussi).

En pratique, lorsque la cohérence est non nulle mais inférieure à 1, l'un des facteurs suivants est responsable de cette divergence par rapport au cas du système linéaire idéal [Bendat 1980] :

- Du bruit est présent lors de la mesure de l'entrée et de la sortie (fig. 1.20a).
- Des erreurs de biais sont présentes dans les estimées des spectres.
- Le système reliant $y(t)$ à $x(t)$ n'est pas linéaire.
- La sortie $y(t)$ est due à d'autres entrées en plus de $x(t)$ (fig. 1.20b).

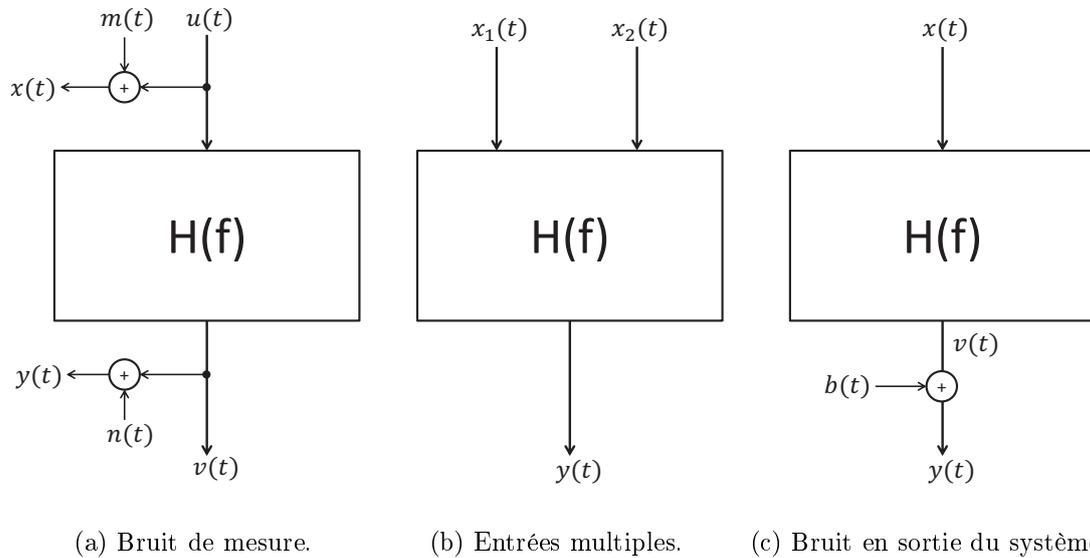


FIGURE 1.20 – Différents cas de systèmes linéaires non idéaux (à cohérence inférieure à 1).

Prenons l'exemple de la présence d'un bruit $b(t)$ décorrélé de $x(t)$ présent uniquement sur la sortie du système (fig. 1.20c). L'autospectre $\Gamma_{yy}(f)$ mesuré en sortie est ainsi la somme de la sortie "idéale" correspondant au système linéaire sans bruit, $\Gamma_{vv}(f)$, due à l'entrée $x(t)$, et de l'autospectre du bruit $\Gamma_{bb}(f)$:

$$\Gamma_{yy}(f) = \Gamma_{vv}(f) + \Gamma_{bb}(f) \quad (1.79)$$

avec

$$\Gamma_{vv}(f) = |H(f)|^2 \Gamma_{xx}(f) \quad (1.80)$$

où $H(f)$ est la fonction de transfert du système linéaire. On peut également démontrer [Bendat 1980] que :

$$\Gamma_{xy}(f) = H(f) \Gamma_{xx}(f) \quad (1.81)$$

On peut donc remplacer $H(f)$ dans (1.80) :

$$\Gamma_{vv}(f) = \left| \frac{\Gamma_{xy}(f)}{\Gamma_{xx}(f)} \right|^2 \Gamma_{xx}(f) = \gamma_{xy}^2(f) \Gamma_{yy}(f) \quad (1.82)$$

Il vient :

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{\Gamma_{vv}(f)}{\Gamma_{yy}(f)} \quad (1.83)$$

On peut donc remonter à l'autospectre $\Gamma_{vv}(f)$ grâce au produit de la cohérence par l'autospectre de la sortie. On appelle $\Gamma_{vv}(f)$ l'autospectre cohérent de sortie du système [Bendat 1980]. On peut donc interpréter la fonction de cohérence comme la proportion du spectre de la sortie $y(t)$ qui est linéairement causée par $x(t)$, tandis que le spectre de bruit de sortie $\Gamma_{bb}(f)$ représente la proportion du spectre de sortie qui n'est pas obtenue par une opération linéaire sur l'entrée $x(t)$.

1.3.1.2 Cas d'un système à entrées multiples et sortie unique

Dans des problèmes d'identification de sources acoustiques, on se situe bien souvent dans le cas d'un système à plusieurs entrées (les sources) et une sortie unique (résultat de la formation de voies par exemple). Dans ce genre de situations, la cohérence peut se révéler être un outil puissant dans le but d'évaluer la contribution d'une source particulière sur la sortie.

En effet, en se plaçant dans le contexte d'un véhicule routier, une source peut soit désigner une zone géométrique depuis laquelle un signal est émis (par exemple le passage de roue), soit une source au sens physique du terme (dans la zone du passage de roue, le signal émis provient à la fois du GMP et du bruit de roulement). Une méthode d'imagerie classique produit une cartographie du véhicule en identifiant les zones source, mais notre connaissance de celui-ci nous permet de supposer que le signal correspondant à ces zones comporte des contributions de plusieurs sources physiques, pouvant être ou non décorréliées.

Considérons ici des signaux d'entrée $x_i(t)$ et toujours une sortie $y(t)$. Dans le cas où les entrées sont décorréliées les unes des autres, l'autospectre de la partie de $y(t)$ due uniquement à l'entrée $x_i(t)$ (noté $\Gamma_{y:x_i}(f)$) est donné par [Bendat 1980] :

$$\Gamma_{y:x_i}(f) = \gamma_{x_i y}^2(f) \Gamma_{yy}(f) \quad (1.84)$$

On remarque ici que cette équation est semblable à l'équation (1.82) qui correspondait à la présence d'un bruit en sortie du système, décorrélé de l'entrée unique. Dans le cas de (1.84), les

entrées autres que $x_i(t)$, décorréées de cette dernière, sont équivalentes à du bruit que l'on filtre pour obtenir $\Gamma_{y:x_i}(f)$.

Si l'on peut espérer séparer simplement les contributions des sources décorréées en utilisant l'équation (1.84) (sous réserve de pouvoir calculer la cohérence entre une source singulière et la sortie, donc en particulier de pouvoir mesurer ladite source), de nombreux problèmes peuvent en pratique limiter cet usage [Bendat 1980] :

1. Des imprécisions dans la mesure des sources : par exemple, si l'on choisit de mesurer le bruit émis par le GMP par un capteur embarqué, il y a un risque selon le placement du capteur que le signal mesuré ne contienne pas toute l'information nécessaire pour le caractériser. Le bloc moteur est en effet un élément complexe de grande taille, la production du bruit total résultant de divers phénomènes physiques ayant lieu à différents endroits du moteur (voir section 1.1). Il peut également y avoir du bruit de mesure, que ce soit en entrée ou en sortie, comme illustré par la figure 1.20a.
2. Des interférences entre mesures de différentes sources : en reprenant l'exemple de la mesure embarquée du bruit de GMP, on risque aussi de capter du bruit provenant d'une autre source que le GMP lui-même (par exemple du bruit de roulement). Ce faisant, on rend les *signaux mesurés* corrélés entre eux, quand bien même les *sources* elles-mêmes ne le seraient pas, en mélangeant du signal d'une source avec celui d'une autre.
3. Certaines sources sont corrélées entre elles : de même que les signaux mesurés utilisés pour calculer la cohérence peuvent être corrélés entre eux à cause d'interférences entre mesures, certaines sources peuvent être physiquement corrélées. Par exemple le bruit produit par l'échappement est corrélé au bruit du GMP dans la mesure où l'origine physique du bruit d'échappement se situe en partie au niveau du moteur, zone depuis laquelle des ondes de choc se propagent dans le circuit d'échappement (voir section 1.1).
4. Des erreurs dues à des retards temporels sur l'entrée ou la sortie : si le décalage temporel est du même ordre que le temps de mesure total, il y a un risque que les parties de signal utilisées pour le calcul de la cohérence ne correspondent pas entre l'entrée et la sortie, faisant ainsi chuter la cohérence. Plus la partie de signal manquante (de durée égale au décalage) est petite devant la longueur totale des signaux analysés, et moins la cohérence diminue.
5. Une rétroaction entrée/sortie.
6. Des non-linéarités entre l'entrée et la sortie.

L'usage de *fonctions de cohérences partielles* peut permettre de résoudre en partie le problème causé par des sources corrélées ou des interférences entre des mesures des entrées. Prenons pour simplifier le cas de deux sources représentées par les fonctions $x_1(t)$ et $x_2(t)$, et une sortie $y(t)$. Soient $\hat{x}_{2,1}(f)$ et $\hat{y}_{y,1}(f)$ les transformées de Fourier de $x_2(t)$ et $y(t)$ avec les effets vus à travers une transformation linéaire de $x_1(t)$ retirés à la fois de $x_2(t)$ et $y(t)$. Soient les fonctions de transfert $H_{12}(f)$ et $H_{1y}(f)$ représentant les systèmes linéaires permettant d'obtenir respectivement $x_2(t)$ et $y(t)$ par $x_1(t)$:

$$H_{12}(f) = \frac{\Gamma_{12}(f)}{\Gamma_{11}(f)}, \quad H_{1y}(f) = \frac{\Gamma_{1y}(f)}{\Gamma_{11}(f)} \quad (1.85)$$

On définit les variables aléatoires conditionnées $\hat{x}_{2,1}(f)$ et $\hat{y}_{y,1}(f)$ de la manière suivante :

$$\begin{aligned}\hat{x}_{2,1}(f) &= \hat{x}_2(f) - H_{12}(f)\hat{x}_1(f) \\ \hat{y}_{y,1}(f) &= \hat{y}(f) - H_{1y}(f)\hat{x}_1(f)\end{aligned}\tag{1.86}$$

Soit $\gamma_{2y,1}^2(f)$ la fonction de cohérence partielle entre $x_2(t)$ et $y(t)$ avec les effets vus à travers une transformation linéaire de $x_1(t)$ retirés à la fois de $x_2(t)$ et $y(t)$, on peut la définir comme la fonction de cohérence ordinaire entre les variables aléatoires conditionnées $\hat{x}_{2,1}(f)$ et $\hat{y}_{y,1}(f)$ [Bendat 1980] :

$$\gamma_{2y,1}^2(f) = \frac{|\Gamma_{2y,1}(f)|^2}{\Gamma_{22,1}(f)\Gamma_{yy,1}(f)}\tag{1.87}$$

où

$$\begin{aligned}\Gamma_{22,1}(f) &= E\{\hat{x}_{2,1}(f)\hat{x}_{2,1}^*(f)\} \\ \Gamma_{yy,1}(f) &= E\{\hat{y}_{y,1}(f)\hat{y}_{y,1}^*(f)\} \\ \Gamma_{2y,1}(f) &= E\{\hat{x}_{2,1}(f)\hat{y}_{y,1}^*(f)\}\end{aligned}\tag{1.88}$$

La cohérence partielle représente donc une fonction de la fréquence qui indique s'il existe une transformation linéaire entre $\hat{x}_{2,1}$ et $\hat{y}_{y,1}$. On peut également exprimer cette cohérence partielle de manière explicite en fonction des autospectres, interspectres et fonctions de cohérence ordinaires entre les entrées et la sortie comme suit (la dépendance fréquentielle n'est pas notée pour alléger l'expression) :

$$\gamma_{2y,1}^2 = \frac{|\Gamma_{2y}\Gamma_{11} - \Gamma_{1y}\Gamma_{21}|^2}{\Gamma_{11}^2\Gamma_{22}\Gamma_{yy}(1 - \gamma_{12}^2)(1 - \gamma_{1y}^2)}\tag{1.89}$$

On peut ainsi calculer la contribution $\Gamma_{y,2,1}$ de la source 2 statistiquement décorrélée de la source 1 (donc $\Gamma_{21} = 0$ et $\gamma_{12}^2 = 0$) sur la sortie :

$$\Gamma_{y,2,1}(f) = \gamma_{2y,1}^2(f)\Gamma_{yy,1}(f)\tag{1.90}$$

où

$$\Gamma_{yy,1}(f) = \Gamma_{yy}(f)(1 - \gamma_{1y}^2(f))\tag{1.91}$$

L'enjeu est de savoir dans quels cas utiliser la formulation donnée par l'équation (1.84) et par l'équation (1.90) pour calculer correctement les contributions individuelles des sources, de manière à retrouver en les additionnant l'autospectre de la sortie attendue. Cela dépend de l'origine physique de la corrélation entre sources. Si par exemple elle provient physiquement de la source 1, alors la contribution donnée par eq. (1.84) rend bien compte de la réelle contribution de la source 1 puisqu'elle prend en compte tous les chemins de transmissions possibles entre elle et la sortie, c'est-à-dire le chemin direct et le chemin passant par la source 2. Si cette dernière était "éteinte", on calculerait toujours la même contribution pour la source 1. En revanche, si l'on calcule de la même manière la contribution de la source 2, on se rend alors compte que la

somme des deux dépasse la sortie réelle, on aura surestimé la contribution de la deuxième source par l'apport de la première source. Il convient donc d'évaluer la contribution de la deuxième source en utilisant une fonction de cohérence partielle (eq. (1.90)) [Bendat 1980]. Finalement, à la condition d'avoir correctement déduit d'où provenait la corrélation entre les sources (dans notre exemple de la source 1), la sortie peut être obtenue par la somme des contributions calculées de manière adéquate :

$$\Gamma_{y:x}(f) = \gamma_{1y}^2(f)\Gamma_{yy}(f) + \gamma_{2y\cdot 1}^2(f)\Gamma_{yy\cdot 1}(f) \quad (1.92)$$

On imagine aisément que l'application de ce type d'analyse à un cas pratique d'imagerie acoustique se heurte à plusieurs des problèmes listés plus haut, d'autant plus qu'il est souvent difficile, voire impossible, de connaître l'ensemble des interactions entre sources et des paramètres pouvant varier par rapport au cas idéal de système parfaitement linéaire sans bruit. En effet, on risque d'être en présence des problèmes numérotés de 1 à 3 principalement (dans la liste précédente), avec la difficulté d'obtenir une mesure embarquée propre des sources, les possibles interférences entre mesures des sources et la potentielle corrélation physique entre elles. Les retards sont petits devant la durée d'analyse, ce qui reste tout de même à vérifier. Enfin, il n'y a *a priori* pas de rétroaction entrée/sortie ou de non-linéarité dans le trajet entre les sources et l'antenne de capteurs. Il est ainsi intéressant d'examiner les stratégies qui ont été utilisées pour des applications faisant l'usage des notions de cohérence ordinaire et partielle.

1.3.2 Application pour la séparation de sources acoustiques

1.3.2.1 Analyse spectrale conditionnée et analyse spectrale en composantes principales

Les éléments énoncés plus haut ont donné naissance à l'analyse spectrale conditionnée (ASC). Elle a été proposée par Bendat [Bendat 1976], et il s'agit d'une version de l'utilisation de la cohérence partielle présentée dans la section 1.3.1.2 étendue au cas des systèmes à entrées et sorties multiples (ou *MIMO* pour "Multiple Inputs Multiple Outputs"). On peut aussi citer dans les méthodes faisant intervenir la notion de cohérence l'approche appelée analyse spectrale en composante principale (ACP). Elle a été proposée par Price et Bernhard sous le nom de cohérences virtuelles [Price et Bernhard 1986], et cherche à identifier des sources en aveugle, c'est-à-dire sans référence mesurée, et s'apparente aux approches dites non-supervisées. Ces deux approches sont décrites par Leclère [Leclere 2012] qui présente également leur application à divers cas expérimentaux réalisés dans des études antérieures [Leclère et al. 2005a;b].

Analyse spectrale conditionnée (ASC)

L'analyse spectrale conditionnée consiste à calculer les cohérences partielles et interspectres "conditionnés" par certaines voies, c'est-à-dire en leur retirant la contribution de ces dernières. Considérons le cas général de N_S sources représentées par leurs signaux $x_i(t)$ et toujours une sortie $y(t)$. L'interspectre entre l'entrée $x_i(t)$, $i \neq 1$ et la sortie $y(t)$ sans la contribution de la source 1 s'obtient par [Bendat 1976] :

$$\Gamma_{iy\cdot 1} = \frac{\Gamma_{11}\Gamma_{iy} - \Gamma_{i1}\Gamma_{1y}}{\Gamma_{11}}, \quad i = 2, 3, \dots, N_S \quad (1.93)$$

On peut obtenir de la même manière les autospectres des sources Γ_{ii-1} ou encore les interspectres entre sources Γ_{ij-1} sans la contribution de la source 1 en choisissant de manière adéquate les indices i et y dans cette formule. Ce processus peut être réalisé en cascade, et ainsi retirer la contribution par exemple de la deuxième source après avoir retiré celle de la première :

$$\Gamma_{iy-12} = \frac{\Gamma_{22-1}\Gamma_{iy-1} - \Gamma_{i2-1}\Gamma_{2y-1}}{\Gamma_{22-1}}, \quad i = 3, 4, \dots, N_S \quad (1.94)$$

On peut de cette manière conditionner l'interspectre de sortie par autant de voies que voulu, et comparer ainsi l'influence des contributions des différentes sources sur la sortie du système. Wang et Crocker ont cependant montré que l'utilisation d'une telle approche ne peut être efficace qu'à condition d'avoir une faible cohérence entre les entrées mesurées [Wang et Crocker 1983].

Analyse spectrale en composantes principales (ACP)

L'analyse spectrale en composantes principales se base quant à elle sur une décomposition propre de la matrice interspectrale $\bar{\Gamma}$:

$$\bar{\Gamma} = \bar{\Psi}\bar{\Sigma}\bar{\Psi}^* \quad (1.95)$$

où $\bar{\Sigma}$ est une matrice diagonale des valeurs propres positives qui représente la matrice interspectrale des entrées et $\bar{\Psi}$ les fonctions de transfert. L'intérêt d'une telle matrice diagonale est qu'elle représente des entrées décorrélées : on peut ainsi déterminer le nombre de sources "virtuelles" décorrélées, c'est-à-dire qui correspondent à une des valeurs propres de la matrice, qui participent à la réponse globale du système. Celles n'ayant qu'une contribution négligeable peuvent être simplement supprimées [Leclere 2012]. On peut par la suite trouver à quelles sources réelles ces sources virtuelles correspondent en calculant leur cohérence γ_{vi}^2 .

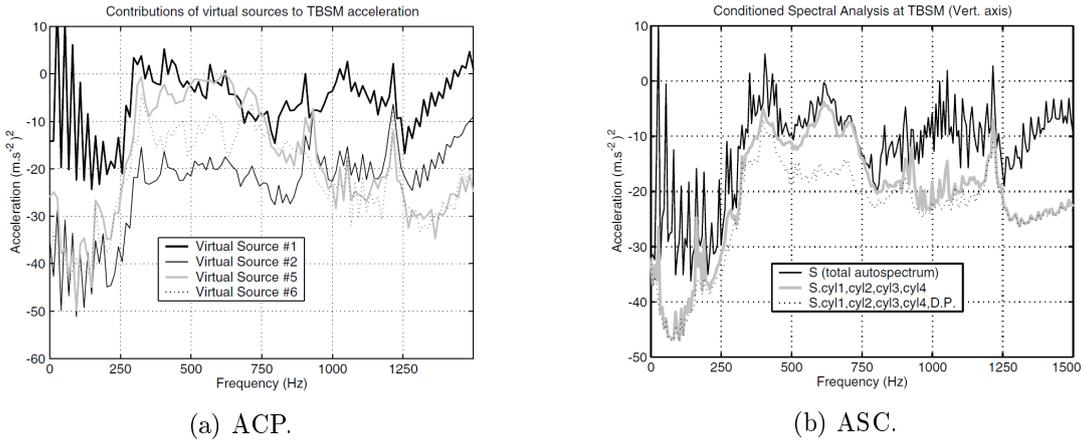


FIGURE 1.21 – Contributions des sources obtenues par ACP et ASC. (a) Contributions des sources virtuelles à l'accélération support moteur. (b) Analyse conditionnée du signal d'accélération support moteur. [Leclère et al. 2005b]

Application de l'ASC et de l'ACP

Ces deux approches peuvent être utilisées de manière complémentaire, comme le montre un exemple d'application dans [Leclère et al. 2005b], étude dont le but est d'identifier les sources de bruit d'un moteur Diesel, et qui permet d'illustrer dans un cas concret le fonctionnement de l'ACP et de l'ASC. Plusieurs capteurs ont ainsi été placés sur les sources potentielles du moteur (accéléromètres au niveau des supports moteur et capteurs de pression cylindre pour tenir compte des combustions). Le résultat de l'ACP est présenté sur la figure 1.21 à gauche, où ne sont représentées que les sources contribuant à plus de 1% du niveau global. Il apparaît que seules quatre sources sont d'importance significative, les sources numéro 1 et 5 étant celles qui contribuent le plus au bruit total. Il s'agit dans un deuxième temps de déterminer à quelles sources physiques ces sources virtuelles sont liées, ce que l'on peut accomplir grâce au calcul des cohérences virtuelles comme vu plus haut.

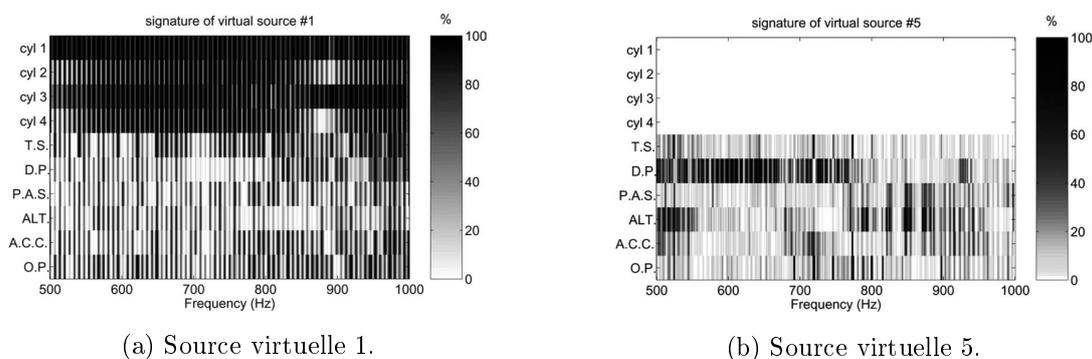


FIGURE 1.22 – Diagrammes de signature des sources virtuelles prépondérantes. [Leclère et al. 2005b]

On représente ces cohérences entre sources virtuelles et signaux de référence à l'aide de diagrammes de signatures, ceux des sources 1 et 5 étant représentés dans la figure 1.22. On constate que la source virtuelle 1 est fortement cohérente avec de nombreux capteurs de référence, mais plus particulièrement avec les pressions cylindres, tandis que la source 5 est quant à elle particulièrement cohérente avec la pompe gazole à certaines fréquences.

L'analyse conditionnée dont le résultat est présenté à droite sur la figure 1.21 montre le conditionnement par les deux familles de sources trouvées par l'ACP (pressions cylindres et pompe gazole). La courbe en noir montre l'autospectre total tandis que les deux courbes grises montrent l'autospectre obtenu en soustrayant la contribution tout d'abord des quatre pressions cylindres, puis de la pompe gazole. Le premier conditionnement retire une grande part de l'énergie totale sauf autour de 900 Hz et 1200 Hz, et le second conditionnement retire l'énergie à ces fréquences particulières qui correspondent à des pics dans le spectre de la source virtuelle 5 : on a bien la confirmation que la contribution à ces fréquences particulières est attribuée majoritairement à la pompe gazole.

1.3.2.2 Autres approches de référencement

Certains auteurs ont proposé d'autres approches utilisant le référencement que l'ASC et l'ACP, qu'ils utilisent ou non la notion de cohérence dans leur méthode. On peut par exemple citer le filtre de Wiener, présenté et illustré sur un cas pratique entre autres par Lamotte et al. [Lamotte et al. 2012] et qui consiste, pour une source $s(t)$ polluée par un bruit inconnu $n(t)$, à extraire la contribution d'un signal de référence $r(t)$. Le filtre de Wiener correspond à l'estimation H_1 d'une fonction de transfert entre $r(t)$ et $s(t)$ qui permet de minimiser l'erreur d'estimation due au bruit sur $s(t)$.

On peut également citer une utilisation "directe" de la fonction de cohérence pour filtrer des signaux, en calculant simplement la partie cohérente d'un signal avec une référence, en considérant que celui-ci se décompose en deux termes, l'un cohérent avec la référence et l'autre incohérent [Lamotte et al. 2012] :

$$S(f) = \gamma_{rs}^2(f)S(f) + (1 - \gamma_{rs}^2(f))S(f) \quad (1.96)$$

où $S(f)$ est l'autospectre de la source $s(t)$. On retrouve dans le premier terme une utilisation de l'équation (1.84) pour obtenir l'autospectre de la partie de $s(t)$ due uniquement à la référence $r(t)$.

La principale limite en ne considérant que le spectre cohérent avec la référence concerne la pollution potentielle de la mesure du signal de référence par d'autres sources non corrélées, ce qui peut conduire à une sous-estimation du spectre en sortie de filtrage [Lamotte et al. 2012].

Une approche similaire, couplée à la formation de voies, a été proposée par Guidati et Sottek [Guidati et Sottek 2008, Guidati 2009] : dans un cas pratique simple avec deux enceintes, en utilisant comme référence soit le signal envoyé à l'une ou l'autre des enceintes, soit en le mesurant à l'aide d'un microphone directement à leur sortie, ils parviennent à totalement masquer la contribution d'une des deux sources (fig. 1.23).

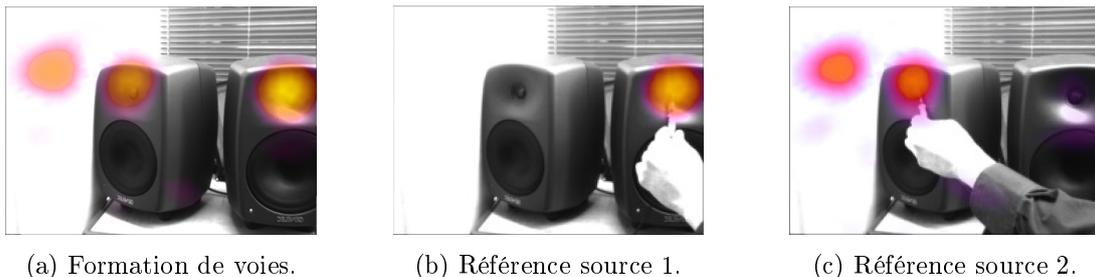


FIGURE 1.23 – Filtrage par cohérence avec un signal de référence. (a) Formation de voies non filtrée. (b) Formation de voies filtrée par le signal de la source 1. (c) Formation de voies filtrée par le signal de la source 2. [Guidati et Sottek 2008]

Le signal de référence est acquis de manière synchrone avec l'antenne de récepteurs. Tous les signaux sont alors transformés par Fourier, puis les coefficients complexes calculés de chacun des microphones de l'antenne sont multipliés par les coefficients complexes conjugués normalisés du signal de référence. On calcule ainsi une "matrice interspectrale" entre les signaux des capteurs et le signal de référence $r(t)$ [Garcia-Pedroche et Bennett 2011] (qui n'est en réalité qu'un vecteur

mais qui prend la place de la matrice interspectrale dans la formation de voies fréquentielle) :

$$\mathbf{\Gamma}^{\text{coh}}(f) = E\{\widehat{\mathbf{p}}(f)\widehat{\mathbf{r}}^*(f)\} \quad (1.97)$$

La sortie de formation de voies classique à un point de focalisation F est donnée par l'équation (1.9) $\widehat{b}(f, F) = \mathbf{W}^H(f, F)\widehat{\mathbf{p}}(f)$ où $\mathbf{W}(f, F)$ est le vecteur de pointage correspondant au point focal F . En principe, on obtient une estimation de la valeur quadratique de $\widehat{b}(f, F)$ en calculant l'espérance mathématique de son produit par son conjugué, ce qui donne pour rappel :

$$B(f, F) = \mathbf{W}^H(f, F)\bar{\mathbf{\Gamma}}(f)\mathbf{W}(f, F)$$

où $\bar{\mathbf{\Gamma}}(f) = E\{\widehat{\mathbf{p}}(f)\widehat{\mathbf{p}}^H(f)\}$ est la matrice interspectrale des signaux microphoniques.

La sortie du système de formation de voies à « cohérence » pour un point focal particulier est définie par :

$$B^{\text{coh}}(f, F) = E\{\widehat{b}(f, F)\widehat{\mathbf{r}}^*(f)\} = \mathbf{W}^H(f, F)E\{\widehat{\mathbf{p}}(f)\widehat{\mathbf{r}}^*(f)\} = \mathbf{W}^H(f, F)\mathbf{\Gamma}^{\text{coh}}(f) \quad (1.98)$$

Dans l'image acoustique obtenue, toutes les sources qui ne sont pas cohérentes avec la source de référence sont atténuées. C'est le cas par exemple sur la figure 1.23-(b), où la réflexion de la source 2 sur le mur est atténuée en même temps que la source elle-même lorsque la source 1 est prise comme référence. Les résultats obtenus sont intéressants, la dynamique de l'image permet d'être améliorée et on peut, au choix, filtrer par cohérence et ne garder que les sources cohérentes avec la référence, ou au contraire les atténuer selon le but de l'expérience. On peut mettre en parallèle ce type de filtrage avec la méthode CLEAN-SC [Sijtsma 2007] décrite dans 1.2.2.6.4 et qui consiste, dans l'algorithme CLEAN, à retirer non seulement la contribution de la source principale, mais aussi toutes les parties du signal qui lui sont *spatialement cohérentes*.

Enfin, une approche intermédiaire entre CLEAN-SC et le filtrage par cohérence a également été proposée par Kim et al. [Kim et al. 2012]. Le but est de s'affranchir de la nécessité d'une mesure ad-hoc d'une référence, qui peut être problématique selon l'application considérée, et d'utiliser directement le signal reconstruit par la formation de voies comme une référence afin de filtrer par la cohérence entre ce signal et les signaux mesurés. Nous reviendrons sur cette méthode dans le deuxième chapitre.

L'ensemble de ces techniques et exemples d'application reste cependant cantonné à une application statique à l'heure actuelle. Il s'agit donc d'une piste à explorer pour utiliser ce type d'approches dans le cas de sources mobiles. Se pose alors le problème de l'acquisition de la référence, notamment du choix du type de capteurs, de leur emplacement et de leur nombre, sans compter une complexité expérimentale supplémentaire s'il est nécessaire de multiplier les capteurs embarqués sur le véhicule. Ces sujets seront traités dans les chapitres 2 et 4.

Méthode temporelle adaptée aux véhicules routiers : CLEAN T

Sommaire

2.1	Introduction et spécificité du bruit au passage dans un contexte routier	59
2.2	Éléments théoriques de CLEAN T	61
2.2.1	Principe de CLEAN T	61
2.2.2	Formalisme de CLEAN T	62
2.2.3	Avantages spécifiques à la formulation temporelle de CLEAN T	65
2.2.4	Filtrage fréquentiel	65
2.2.4.1	Cas de deux sources à spectres large bande disjoints	66
2.2.4.2	Choix des bandes du filtre	67
2.2.4.3	Adaptation de l'algorithme CLEAN T au filtrage fréquentiel	68
2.2.5	Filtrage par cohérence avec un signal de référence	70
2.3	Analyse numérique comparative des performances de CLEAN T	72
2.3.1	Paramètres de simulation et indicateurs de performance	72
2.3.2	Analyse paramétrique	74
2.3.2.1	Paramètre de vitesse	74
2.3.2.2	Paramètre de distance	76
2.3.2.3	Paramètre de rapport signal-sur-bruit	78
2.3.3	Robustesse de la méthode en cas d'écart sur les paramètres	79
2.3.4	Séparation de deux sources proches	82
2.3.5	Synthèse des résultats des simulations numériques	84
2.4	Synthèse sur la méthode CLEAN T	86

2.1 Introduction et spécificité du bruit au passage dans un contexte routier

Le sujet a été brièvement abordé dans le premier chapitre, mais il est important de rappeler ici les enjeux et spécificités de la présente étude afin de justifier les choix de développement qui ont été faits. L'objectif est d'identifier des sources de bruit en mouvement, plus particulièrement d'un véhicule routier, et plusieurs difficultés surviennent dans ce contexte. Par la suite, nous utiliserons le terme de "véhicule" pour désigner un véhicule routier d'une manière générale, et prendrons régulièrement l'exemple du véhicule léger (noté VL par la suite) car il présente certains

intérêts : d'une part, il est compact, par conséquent les sources sont plus proches les unes des autres que dans le cas d'un véhicule plus grand ; d'autre part, les véhicules légers peuvent circuler à des vitesses plus élevées que les véhicules lourds, ce qui constitue un cas plus difficile à traiter. Ainsi, le véhicule léger représente le cas particulier de véhicule routier avec *a priori* les conditions les plus sévères, ce qui est développé dans ce cadre reste donc valable dans des conditions plus favorables. De plus, c'est ce type de véhicule qui a pu être testé expérimentalement dans le cadre de cette thèse, et dont les résultats seront présentés au Chapitre 4.

La première difficulté rencontrée, que partagent toutes les situations de bruit au passage (ou "pass-by") – qu'elles concernent le transport routier, aérien, maritime ou ferroviaire – est que les signaux reçus par les microphones sont instationnaires, que les sources soient elles-mêmes stationnaires ou non, à cause du mouvement. En effet, bien que dans notre étude nous nous plaçons dans le cas de sources stationnaires car le véhicule a une vitesse stabilisée, la transformation source-récepteur est variable au cours du temps, causant l'instationnarité des signaux microphoniques. Celle-ci est partiellement prise en compte dans la formation de voies avec suivi de source comme vu au premier chapitre.

Pour traiter d'un véhicule dans un contexte routier, on place un système de mesure en bord de route ou de piste d'essai, selon le cas. La distance entre le système de mesure et le flanc du véhicule au passage est typiquement comprise entre deux et quatre mètres¹. Malgré les vitesses impliquées relativement faibles dans le contexte routier comparé au contexte aérien, cette proximité avec le système de mesure implique un temps de mesure utile très court, de l'ordre de quelques dixièmes de secondes, afin d'éviter une focalisation d'antenne à des angles trop grands (cf. Chapitre 1). Cette courte durée rend l'analyse fréquentielle des signaux difficile, avec une mauvaise résolution fréquentielle. De plus, comme nous l'avons mentionné au chapitre précédent, la variation des paramètres géométriques de la source en mouvement vue par l'antenne (distance et angle source-récepteur) est d'autant plus rapide que la distance avec le système de mesure est faible (section 1.2.3.1.3), ce qui se répercute en particulier sur le glissement fréquentiel et le facteur de convection dus à l'effet Doppler.

Une autre difficulté provient du fait que certaines des méthodes présentées jusqu'à présent nécessitent d'estimer des grandeurs statistiques, requérant d'effectuer des moyennes statistiques lorsque c'est possible, ou des moyennes temporelles sous hypothèse d'ergodicité dans le cas contraire. Or, pour le bruit au passage de véhicules avec un mouvement linéaire, on ne peut pas envisager plusieurs réalisations d'un même passage pour effectuer ces moyennes statistiques. Si l'on considère au contraire les sources en rotation, leur mouvement est répétable d'une rotation à l'autre, les signaux pouvant alors être considérés comme cyclo-stationnaires et des moyennes statistiques synchronisées pouvant être envisagées [Sijtsma et al. 2001, Geng et al. 2015]. Cette possibilité n'existant pas pour le bruit au passage avec un mouvement linéaire, la totalité du post-traitement de la mesure doit se faire sur un seul passage, une seule réalisation, et par conséquent utiliser des moyennes temporelles. Une autre difficulté survient alors, puisque les durées de passage sont généralement très courtes, de l'ordre de quelques dixièmes de secondes pour les véhicules routiers.

1. Comme expliqué dans le premier chapitre à la section 1.2.2.3, on choisit généralement de placer l'antenne à une distance correspondant à sa largeur totale, la placer à une distance plus courte ne faisant que peu gagner en résolution et d'autres problèmes survenant en sources mobiles lorsque la distance est plus courte, comme expliqué dans la section 1.2.3.1.3.

Finalement, un dernier point qu'il est important de souligner concerne la disposition des sources de bruit d'un véhicule. Sur un VL par exemple, elles sont relativement proches les unes des autres, voire pratiquement confondues si l'on considère le bruit de moteur et le bruit de roulement avant. En effet, la majeure partie du bruit rayonné par le GMP provient de la partie inférieure du véhicule et du passage de roue, zones dans lesquelles on trouve également le bruit de roulement. Une méthode purement géométrique est insuffisamment précise spatialement pour différencier de telles sources, et d'autres stratégies de séparation doivent être envisagées.

Toutes ces particularités montrent la difficulté d'utiliser une approche fréquentielle dans ce contexte. Comme expliqué dans le premier chapitre, les méthodes fréquentielles sont par nature peu adaptées au contexte mobile. Cependant, des développements dans ce sens ont été réalisés et l'approche proposée par Fleury et Bulté [Fleury et Bulté 2011] purement dans le domaine fréquentiel obtient des résultats intéressants, cependant sous hypothèses restrictives. Elle est en effet appliquée au transport aérien (puis maritime [Oudompheng 2015]) et les spécificités du contexte routier semblent rendre son application plus délicate (cf. Chapitre 1). Si cette méthode est implémentée intégralement dans le domaine fréquentiel, le domaine temporel apparaît comme mieux adapté pour suivre les variations à la fois spatiales et temporelles de sources mobiles. Comme nous l'avons vu précédemment, une formulation de la formation de voies avec suivi de source existe pour traiter de sources en mouvement. Néanmoins, cette technique conserve les défauts de la formation de voies classique en termes de résolution à basse fréquence et d'estimation de niveaux dans le cas de sources étendues. La méthode présentée ci-dessous garde les avantages de la formation de voies avec suivi de source pour dédopplériser des sources mobiles et propose de surmonter ses limites et de répondre aux contraintes du contexte routier par divers développements.

2.2 Éléments théoriques de CLEAN

2.2.1 Principe de CLEAN

L'idée de la méthode proposée est d'appliquer l'algorithme de déconvolution CLEAN présenté dans 1.2.2.6.4, mais en le réalisant entièrement dans le domaine temporel, d'où son nom CLEAN pour CLEAN-Temporel. En effet, nous avons vu précédemment les difficultés à implémenter un algorithme de déconvolution dans le domaine fréquentiel pour l'identification de sources mobiles. De même, nous avons détaillé les spécificités du bruit routier au passage pour faire ressortir le fait qu'une approche temporelle serait plus à même de répondre aux verrous rencontrés dans un tel contexte.

En utilisant la formation de voies classique avec suivi de sources, cet algorithme soustrait itérativement des signaux des microphones les contributions temporelles dopplérisées des sources. Les cartographies "dirty" et "clean" de l'algorithme original sont ici d'une nature différente : au lieu d'être des matrices contenant les contributions énergétiques des sources, elles sont dans CLEAN des matrices de signaux sources temporels associés aux positions des sources principales. Le terme de "cartographie", bien qu'incorrect dans ce cas précis, est tout de même conservé pour désigner ces matrices dans l'explication qui suit afin de souligner le parallèle fait avec la méthode originale CLEAN. Ainsi, nous remplacerons l'appellation "dirty map" par "cartographie résiduelle", et "clean map" par "cartographie source".

Une approche similaire a été proposée par Döbler et Schröder, uniquement dans le cas de sources statiques [Döbler et Schröder 2010, Döbler et al. 2010]. Il s'agit d'augmenter la dynamique de la cartographie de formation de voies par le retrait successif des sources dominantes, dans le domaine temporel, et avoir ainsi accès à des sources plus faibles qui sont "masquées" par les sources principales et leur étendue spatiale dans la cartographie. Ils nomment cet algorithme "acoustic eraser" ou "effaceur acoustique". Un peu plus tard, ces mêmes auteurs ont proposé d'utiliser cet algorithme afin de créer une cartographie acoustique avec une meilleure résolution, faisant explicitement le parallèle à la fois avec la méthode CLEAN et avec les procédés de "High Dynamic Range" (HDR) exploités en photographie et dont ils reprennent le nom pour leur méthode [Döbler et Schröder 2012].

Notre approche, développée indépendamment, est en quelque sorte une extension de celle-ci. Tout d'abord, nous incluons un facteur de boucle de manière analogue à CLEAN afin d'ajuster la fraction de signal que l'on retire à chaque itération, permettant d'accroître la robustesse de l'algorithme (voir section 2.2.2). De plus, bien que Döbler et Schröder soulignent le fait d'avoir des signaux sources temporels reconstruits en fin d'algorithme [Döbler et Schröder 2012], ils ne proposent pas d'exploiter cet aspect pourtant intéressant de la méthode, que nous mettrons à profit un peu plus loin dans ce chapitre. Enfin, leur approche ne concerne que des sources fixes, et nous développons ici une extension au cas des sources mobiles.

2.2.2 Formalisme de CLEANT

Comme annoncé plus haut, l'algorithme de CLEANT suit la même ligne directrice que celle de CLEAN, avec toutefois des différences dues à son application au domaine temporel.

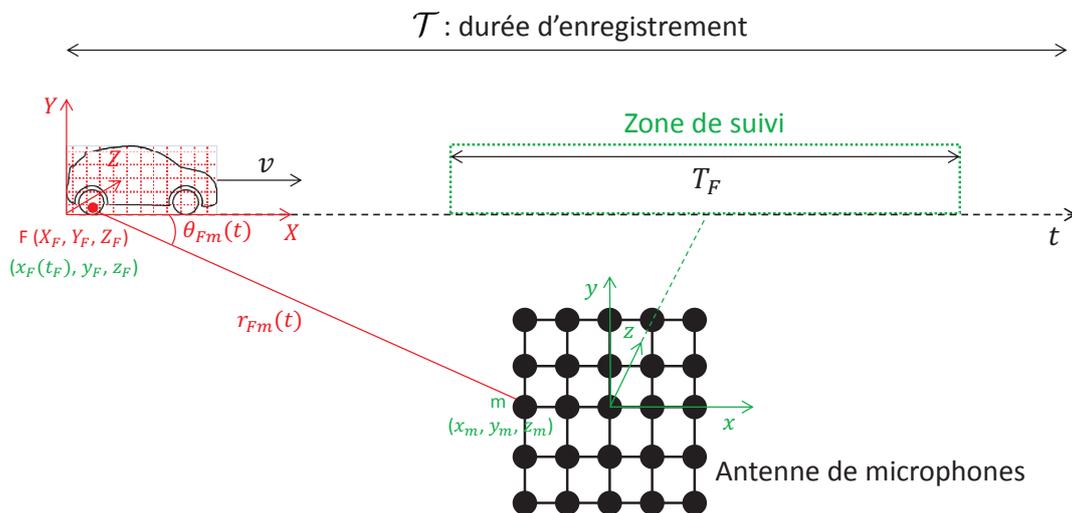


FIGURE 2.1 – Schéma d'une configuration de bruit au passage d'un véhicule routier.

À la base de l'algorithme se trouve la formation de voies avec suivi de source, telle que décrite dans 1.2.3.1. La sortie de cette formation de voies est composée des signaux temporels $b(t, F, \{p_m\})$ reconstruits pour un ensemble de points F de focalisation de la grille de N_F points-

sources pendant l'intervalle de temps T_F . Le signal en dehors de cet intervalle est considéré comme nul sur le reste de l'intervalle d'enregistrement \mathcal{T} (fig. 2.1).

L'algorithme suit les étapes suivantes :

1. Initialisation de la "cartographie" résiduelle Ω et de la "cartographie" source Λ à l'itération $i = 0$:

$$\begin{aligned}\Omega^{(0)}(t, F) &= b(t, F, \{p_m\}) \quad \forall F \in \llbracket 1; N_F \rrbracket \\ \Lambda^{(0)}(t, F) &= 0 \\ p_m^{\text{res}(0)}(t) &= p_m(t), \quad m = 1 \dots N_M\end{aligned}\tag{2.1}$$

où p_m^{res} est le signal du microphone m nettoyé de la contribution du signal temporel de la source dominante, initialisé par le signal enregistré par le microphone m et mis à jour à l'étape 3.

2. À chaque itération i ($i \geq 1$), détection du point focal \hat{F} qui maximise l'énergie des signaux de la "cartographie" résiduelle² :

$$\hat{F} = \underset{F}{\operatorname{argmax}} \left(\int_{\mathcal{T}} \left| \Omega^{(i-1)}(t, F) \right|^2 dt \right)\tag{2.2}$$

3. La contribution dopplérisée de la source dominante localisée en \hat{F} est soustraite des signaux des microphones :

$$\begin{aligned}\forall m \in \llbracket 1; N_M \rrbracket, \\ p_m^{\text{res}(i)} \left(t + \frac{r_{\hat{F}m}}{c} \right) &= p_m^{\text{res}(i-1)} \left(t + \frac{r_{\hat{F}m}}{c} \right) - \gamma \frac{\Omega^{(i-1)}(t, \hat{F})}{r_{\hat{F}m}(t) (1 - M \cos \theta_{\hat{F}m}(t))^2} \mathcal{W}_{\hat{F}}(t)\end{aligned}\tag{2.3}$$

où $\gamma \in [0, 1]$ est le facteur de boucle de CLEAN et $\mathcal{W}(t)$ est une fenêtre d'apodisation, par exemple de type Tukey, centrée sur l'intervalle de temps $T_{\hat{F}}$ correspondant au point \hat{F} .

4. La "cartographie" source est mise à jour :

$$\Lambda^{(i)}(t, \hat{F}) = \Lambda^{(i-1)}(t, \hat{F}) + \gamma \Omega^{(i-1)}(t, \hat{F})\tag{2.4}$$

5. La "cartographie" résiduelle est mise à jour :

$$\Omega^{(i)}(t, F) = b(t, F, \{p_m^{\text{res}(i)}\}) \quad \forall F \in \llbracket 1; N_F \rrbracket\tag{2.5}$$

6. Une nouvelle itération recommence à l'étape 2 à moins que l'un des critères d'arrêt ne soit satisfait.

2. À cette étape, on peut aussi utiliser une autre fonction pour la localisation des sources que la sortie de FV. Selon le cas d'application, une autre fonction pourra être plus adaptée, par exemple la fonction correspondant au maximum de vraisemblance [Faure 2011].

La discussion concernant les critères d'arrêt possibles et le choix du facteur de boucle γ présentée au premier chapitre, dans la section 1.2.2.6.4, reste valable pour CLEAN. Le critère d'arrêt optimal peut varier selon les situations, et le choix du facteur de boucle doit être l'expression d'un compromis entre robustesse et rapidité d'exécution de l'algorithme.

On remarque que la sortie de formation de voies avec suivi de source $b(t, F, \{p_m\})$ à la première itération, et la mise à jour de la "cartographie" résiduelle à l'étape 4 par $b(t, F, \{p_m^{\text{res}(i)}\})$ donnent des signaux dédopplérisés. Finalement, tous les signaux-sources temporels reconstruits non nuls sont conservés dans la "cartographie" source, en regard de leurs positions associées aux éléments de la matrice, et sont donc disponibles pour tout type d'analyse, comme une estimation de leur densité spectrale de puissance par exemple. Nous pouvons en particulier créer un affichage des positions des sources et de leurs niveaux sur la grille de points-sources, à toute fréquence (fig. 2.2).

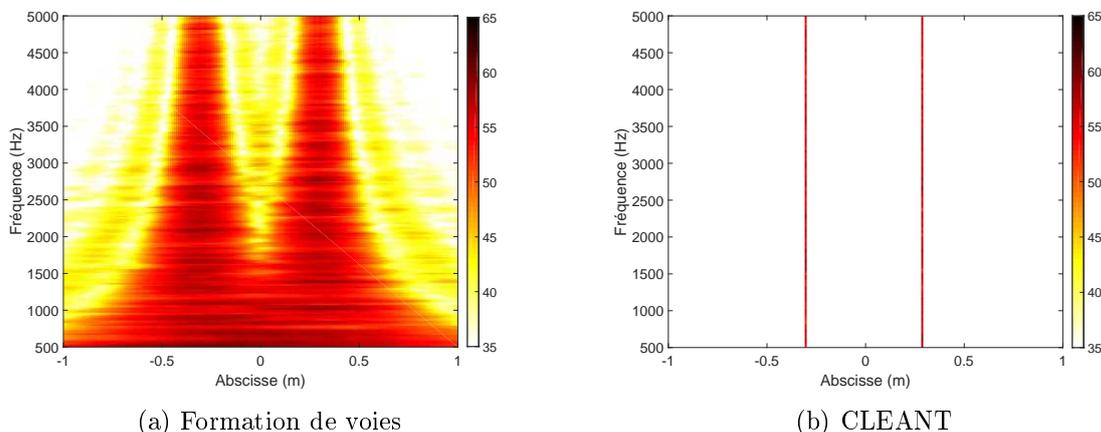


FIGURE 2.2 – Cartographie obtenue par simulation avec la formation de voies avec suivi de sources (a) et avec CLEAN (b). Antenne linéaire (35 microphones, espace intercapteurs 5 cm), distance antenne-source 3 m, vitesse 50 km.h⁻¹, 2 sources de bruit blanc décorréliées de même niveau. Échelle de couleur : Niveau (dB).

On remarque sur cette figure que CLEAN donne deux sources bien localisées sur l'ensemble de la bande de fréquence étudiée (fig. 2.2b) là où la formation de voies avec suivi de source seule ne permet pas de distinguer les deux sources en dessous d'une certaine fréquence, à cause de la mauvaise résolution à basse fréquence de la méthode (fig. 2.2a). Cela s'explique par le fait que CLEAN utilise dans la deuxième étape de l'algorithme (détection de la source dominante) l'énergie présente à haute fréquence – là où la résolution de la FV est meilleure – pour compenser la mauvaise résolution à basse fréquence. C'est le fait de traiter les signaux temporels directement et ainsi l'ensemble des fréquences simultanément qui permet cela. Ce point particulier de CLEAN sera discuté à différentes reprises par la suite, car il est crucial à garder à l'esprit lorsque la méthode est comparée à d'autres, ainsi que lors des discussions sur un éventuel filtrage fréquentiel.

2.2.3 Avantages spécifiques à la formulation temporelle de CLEAN T

L'utilisation de la formation de voies avec suivi de source permet de dédopplériser convenablement les signaux reçus par les microphones en provenance d'une source située au point focal. Une déconvolution classique aurait consisté à calculer les puissances des sources par bandes de fréquences ou en bandes fines, puis à calculer une PSF approximative, le mouvement des sources ne pouvant pas être formellement pris en compte dans celle-ci. Ici, il est inutile de calculer une quelconque PSF puisqu'on agit directement sur les signaux sources estimés. De plus, le traitement temporel est intrinsèquement large bande, et permet donc de traiter toutes les fréquences en même temps. On peut néanmoins envisager de filtrer les signaux après l'étape de formation de voies afin de faire un traitement par bandes de fréquences, qui permet d'améliorer le résultat dans certaines situations. Cette possibilité est détaillée dans la section 2.2.4.

L'autre avantage majeur de cette méthode temporelle est le fait de disposer à la fin de l'ensemble des signaux sources estimés avec leurs positions respectives. Comme proposé plus haut, on peut donc générer une cartographie précise des sources, mais il est également possible d'envisager d'autres applications qui requièrent d'avoir des signaux temporels : mettre en place des expériences de perception auditive avec ces signaux, faire de l'auralisation³, de la classification [Leiba et al. 2016] ou encore dans le cas de sources tournantes, faire de la détection de défauts⁴ (pour des applications quelque peu différentes de l'identification de sources sur un véhicule au passage) par exemple. Mais le point le plus prometteur pour notre étude est le fait de pouvoir mesurer la cohérence entre ces signaux reconstruits et des signaux de référence, afin de rajouter un critère d'identification autre que géométrique, pour éventuellement séparer deux sources géométriquement confondues (ou du moins très proches l'une de l'autre). Cette application sera étudiée dans la section 2.2.5.

On peut noter cependant que la méthode CLEAN T implique un temps de calcul qui peut être relativement long, notamment les étapes 1 et 5 dans lesquelles on effectue une interpolation. Cet aspect n'est pas nécessairement gênant, dans la mesure où dans notre cas, les durées de passages sont courtes. Une certaine prudence vis-à-vis du résultat est également de mise puisque, comme pour toute méthode heuristique, aucune garantie n'est donnée sur le fait que la solution trouvée soit optimale par rapport à un critère précis.

2.2.4 Filtrage fréquentiel

Comme mentionné plus haut, CLEAN T est un algorithme large bande puisqu'il opère dans le domaine temporel. Il peut cependant être intéressant de le modifier dans certains cas, afin qu'il agisse par bandes de fréquences. Dans les situations où les sources sont suffisamment éloignées les unes des autres pour ne pas être trop affectées par les lobes secondaires de leurs voisines lors de la formation de voies, cette modification n'est pas nécessaire. En revanche, dans de nombreuses situations problématiques, les sources se trouvent justement dans un espace trop réduit, dégradant ainsi le résultat à la fois de la formation de voies, et de CLEAN T. Le filtrage fréquentiel

3. Par exemple Meng et al. utilisent les signaux reconstruits par formation de voies sur source mobile pour une application de ce type, bien que celle-ci s'arrête au stade de la formation de voies uniquement [Meng et al. 2018].

4. Cardenas Cabada et al. utilisent des signaux reconstruits par formation de voies pour cela [Cardenas Cabada et al. 2017].

devient alors intéressant à condition que les sources proches aient des contenus spectraux bien différenciés : il devient possible d'améliorer les performances de l'algorithme, par exemple dans le cas d'un bruit blanc d'une part et d'une source tonale d'autre part, ou bien de deux bruits ayant des supports spectraux disjoints.

2.2.4.1 Cas de deux sources à spectres large bande disjoints

Considérons le cas de deux sources de bruit large bande dont les spectres sont disjoints. Une simulation d'un cas à deux sources proches illustre le filtrage fréquentiel (fig. 2.3) : la première source est un bruit allant de 1,5 à 2,5 kHz, située à l'abscisse -5 cm ; la deuxième est un bruit allant de 3,5 à 4,5 kHz, située à l'abscisse +5 cm. Sans filtrage fréquentiel, ces sources sont trop proches pour être différenciées par la méthode qui trouve une source principale à l'abscisse +1 cm (fig. 2.3a) et des sources secondaires aux abscisses -14 cm et +7 cm. L'utilisation d'un filtre pour séparer les deux bandes de fréquence permet de retrouver les sources aux positions attendues (fig. 2.3b), avec toutefois quelques petites sources parasites mais négligeables.

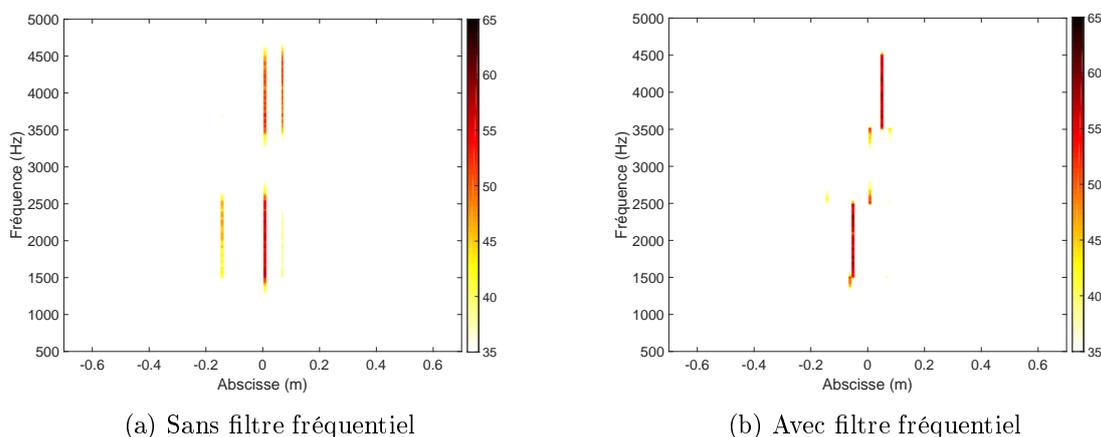


FIGURE 2.3 – Cartographie obtenue par simulation avec CLEANT sans filtre fréquentiel (a) et avec filtre (b). Antenne linéaire (35 microphones, espace intercapteurs 5 cm), distance antenne-source 3 m, vitesse 50 km.h⁻¹, 2 sources de bruit à supports disjoints. Échelle de couleur : Niveau (dB).

On peut ici souligner un point important de CLEANT, qui appelle à être vigilant dans son application. Si l'on regarde le résultat d'une formation de voies avec suivi de source dans la même situation, on observe que l'on repère bien les deux sources, avec l'étalement caractéristique de la méthode. En localisant le maximum uniquement, on parvient à trouver à peu près la bonne localisation. Il peut paraître étonnant que dans cette configuration, CLEANT ne soit pas capable sans filtrage de localiser correctement les sources, et pourtant il s'agit de la même raison pour laquelle cette méthode peut être performante.

Comme nous l'avons vu en commentaire de la figure 2.2, CLEANT permet d'améliorer le résultat de la formation de voies à basse fréquence par l'utilisation de l'énergie contenue dans les hautes fréquences des signaux reconstruits. Or, cette caractéristique peut dans certains cas dégrader le résultat, comme cela est illustré par la figure 2.4b associée aux mêmes conditions

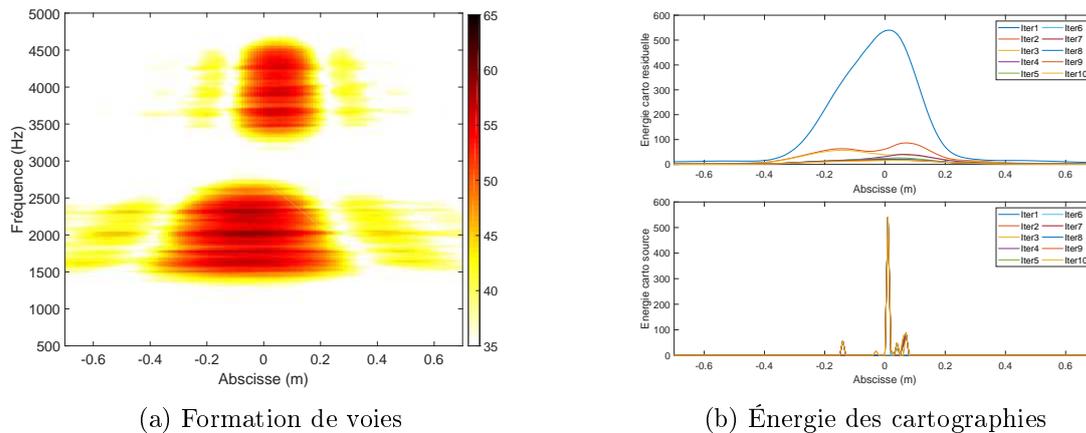


FIGURE 2.4 – Cartographie obtenue par simulation avec FV (a) et évolution de l'énergie des cartographies résiduelles et source dans CLEANT sur 10 itérations (b). Antenne linéaire (35 microphones, espace intercapteurs 5 cm), distance antenne-source 3 m, vitesse 50 km.h⁻¹, 2 sources de bruit à supports fréquentiels disjoints. Échelle de couleur : Niveau (dB).

que la figure 2.3. La recherche de la source dominante à une itération se fait sur l'énergie des signaux résiduels, en analysant chaque point focal de la grille-source. Or, si l'on considère une seule abscisse située entre les deux sources dans la cartographie de formation de voies (fig. 2.4a), on se rend compte que les signaux des deux sources sont mélangés, bien qu'à des fréquences différentes. Mais CLEANT prend en compte l'intégralité des fréquences dans sa version non filtrée, le tracé de l'énergie totale de la cartographie résiduelle permet ainsi de constater qu'à la première itération, tout se passe comme si une seule source était présente à cause de cette interaction entre sources (fig. 2.4b), d'où le résultat obtenu sans filtrage (fig. 2.3a).

2.2.4.2 Choix des bandes du filtre

En pratique, l'utilisateur est souvent confronté à des cas plus complexes : présence d'un plus grand nombre de sources, spectres de supports non-disjoints, sources tonales et bruits large bande présents simultanément, entre autres difficultés. Plusieurs possibilités sont alors envisageables et conditionnent la façon d'implémenter le filtrage.

On peut dans un premier temps définir un certain nombre de bandes de fréquences correspondant aux supports fréquentiels des différents bruits et qui couvrent toute l'étendue fréquentielle étudiée, puis définir des filtres pour chacune de ces bandes. La manière de les choisir dépend de la connaissance *a priori* des sources : si l'on sait sur quelles bandes de fréquences certaines sont susceptibles d'émettre, il suffit de choisir les bandes du filtre en accord avec cette connaissance. Cependant, si l'on ne possède aucune information sur les sources, un moyen de définir ces bandes est de tracer le spectre du signal reçu par le micro central de l'antenne. Bien que le spectre soit modifié par l'effet Doppler, il peut être possible de distinguer des zones fréquentielles de bruits lorsque celles-ci sont disjointes, ou encore la présence d'une source tonale à isoler.

On peut également se concentrer sur une bande de fréquence unique, ou sur plusieurs bandes non-consécutives, c'est-à-dire réaliser le traitement de manière isolée et non plus sur l'ensemble

de la gamme de fréquences considérée. Ce choix peut se révéler particulièrement pertinent si l'on souhaite cibler une source précise et dont on connaît déjà l'étendue spectrale.

Le choix des bandes de fréquences résulte enfin d'un compromis entre le traitement large bande qui permet à CLEAN d'utiliser avantageusement l'énergie à haute fréquence pour localiser sur l'ensemble de la bande, et un traitement à bandes plus fines pour lequel cet avantage diminue mais qui permet de traiter plus précisément certaines sources, telles que des sources harmoniques par exemple.

2.2.4.3 Adaptation de l'algorithme CLEAN au filtrage fréquentiel

Dans le cas où l'on souhaite étudier l'ensemble de la gamme de fréquences émises par toutes les sources, ou en cas d'incertitude sur le contenu spectral de celles-ci, le filtrage fréquentiel s'insère dans l'algorithme présenté dans 2.2.2 juste après l'étape de formation de voies, soit juste avant l'étape 2. On décompose le signal par bandes de fréquence, de telle sorte que la somme des signaux filtrés soit égale au signal total. La recherche de la source dominante et le calcul de sa contribution aux signaux microphones se font par bande de fréquences. Les signaux microphones résiduels sont obtenus en soustrayant l'ensemble des contributions calculées pour chaque bande, et la "cartographie" source est mise à jour en prenant en compte l'ensemble de ces contributions.

Pour N_b bandes de fréquence, l'algorithme ainsi modifié devient :

1. Initialisation de la "cartographie" résiduelle Ω et de la "cartographie" source Λ à l'itération $i = 0$:

$$\begin{aligned}\Omega^{(0)}(t, F) &= b(t, F, \{p_m\}) \quad \forall F \in \llbracket 1; N_F \rrbracket \\ \Lambda^{(0)}(t, F) &= 0 \\ p_m^{res(0)}(t) &= p_m(t), \quad m = 1 \dots N_M\end{aligned}\tag{2.6}$$

2. À chaque itération i ($i \geq 1$), décomposition du signal par bande de fréquence :

$$\Omega^{(i)}(t, F) = \sum_{k=1}^{N_b} \Omega_k^{(i)}(t, F)\tag{2.7}$$

où $\Omega_k(t, F)$ est la composante du signal dédopplérisé en sortie de formation de voies focalisée au point F dans la $k^{\text{ème}}$ bande de fréquence.

3. La boucle sur les bandes de fréquence commence :

- (a) Pour chaque bande de fréquence k , détection du point focal \hat{F}_k qui maximise l'énergie des signaux de la "cartographie" résiduelle :

$$\hat{F}_k = \operatorname{argmax}_F \left(\int_{\mathcal{T}} \left| \Omega_k^{(i-1)}(t, F) \right|^2 dt \right)\tag{2.8}$$

- (b) La contribution de la source dominante d'une bande de fréquence k est soustraite des

signaux des microphones :

$$\forall m \in \llbracket 1; N_m \rrbracket,$$

$$p_m^{res(i)} \left(t + \frac{r_{\hat{F}_k m}}{c} \right) = p_m^{res(i-1)} \left(t + \frac{r_{\hat{F}_k m}}{c} \right) - \gamma \frac{\Omega_k^{(i-1)}(t, \hat{F}_k)}{r_{\hat{F}_k m}(t) \left(1 - M \cos \theta_{\hat{F}_k m}(t) \right)^2} \mathcal{W}_{\hat{F}}(t) \quad (2.9)$$

(c) La "cartographie" source est mise à jour :

$$\Lambda^{(i)}(t, \hat{F}_k) = \Lambda^{(i-1)}(t, \hat{F}_k) + \gamma \Omega_k^{(i-1)}(t, \hat{F}_k) \quad (2.10)$$

4. Fin de la boucle sur les bandes de fréquence, la "cartographie" résiduelle est mise à jour :

$$\Omega^{(i)}(t, F) = b(t, F, \{p_m^{res(i)}\}) \quad \forall F \in \llbracket 1; N_F \rrbracket \quad (2.11)$$

5. Une nouvelle itération recommence à l'étape 2 à moins que l'un des critères d'arrêt ne soit satisfait.

La deuxième étape de l'algorithme s'effectue sur des signaux dédopplérisés : à la première itération, la sortie de la formation de voies avec suivi de source $b(t, F, \{p_m\})$ et la mise à jour de la "cartographie" résiduelle à l'étape 4 par $b(t, F, \{p_m^{res(i)}\})$ donnent en effet des signaux dédopplérisés. Différentes stratégies de filtrage peuvent être adoptées à cette étape, en particulier en fonction du contenu spectral des signaux qui influe également sur le choix des bandes de filtrage comme discuté dans la section 2.2.4.2.

On remarque qu'à la fin de la boucle sur les bandes de fréquence, la somme des contributions des sources dominantes de toutes les bandes a été soustraite des signaux des microphones. L'ensemble des signaux sources reconstruits correspondant à la source dominante dans chaque bande de fréquence a été ajouté à la cartographie source aux points focaux \hat{F}_k associés. Cela signifie qu'une petite dispersion de la position d'une source peut apparaître, selon le contenu du signal filtré. En effet, comme cela a été mentionné plus haut, on utilise dans l'algorithme sans filtrage l'énergie contenue dans les hautes fréquences pour localiser la source avec précision, en compensant la mauvaise résolution de la formation de voies à basse fréquence. Or ici, pour une bande d'étendue réduite et située en basse fréquence, on ne peut pas bénéficier de l'information contenue dans les composantes haute fréquence du signal, et la recherche du maximum peut par conséquent être plus incertaine. Comme cela a été mentionné à la fin de la section 2.2.4.2, il s'agit d'un compromis à trouver.

Dans le cas où l'on souhaite se restreindre à l'étude d'une seule bande isolée pour s'intéresser à une source particulière, on peut simplement filtrer l'ensemble des signaux enregistrés par les microphones de l'antenne et faire la totalité du traitement CLEANT sur ces signaux filtrés. Il convient cependant de prendre une marge sur la bande de fréquences prévue, puisque l'effet Doppler provoque l'étalement des fréquences, qui risqueraient de sortir de la plage fréquentielle caractéristique de la source.

2.2.5 Filtrage par cohérence avec un signal de référence

Le filtrage fréquentiel permet de s'adapter à certaines situations pour permettre à CLEANT de maintenir de bonnes performances malgré la proximité des sources entre elles. Nous avons également vu que, dans le cadre de notre application aux véhicules routiers, certaines sources risquent d'être très proches, voire confondues à l'échelle du lobe principal de FV, en particulier pour le bruit de roulement et celui provenant du GMP. Dans ces conditions, une méthode purement géométrique telle que la formation de voies, de même que CLEANT, ne peut espérer distinguer la contribution de ces sources si elles ont une bande limitée aux zones de mauvaise résolution spatiale. Les stratégies de référencement présentées dans la section 1.3 entrent alors en jeu pour exploiter l'un des avantages de CLEANT, à savoir le fait de disposer des signaux sources temporels reconstruits en fin de traitement.

Si l'on se trouve dans une situation telle que décrite dans la section 1.3.1.2, à savoir à entrées multiples et sortie unique, plusieurs cas de figure s'offrent à nous. Tout d'abord, si l'on est en présence de sources décorrélées, on peut utiliser une approche très directe pour obtenir un effet similaire à celui obtenu dans [Guidati et Sottek 2008], à savoir une cartographie dont on a retiré les sources non cohérentes avec une référence. On suppose qu'on dispose d'un signal cohérent avec une des sources, en pratique par la mesure de celui-ci, on peut alors calculer la cohérence entre ce signal et l'ensemble des signaux temporels reconstruits dont on dispose dans la "cartographie" source : on obtient ainsi une matrice de coefficients compris entre 0 et 1. On peut appliquer l'équation (1.84) en calculant le produit de cette matrice par la matrice des autospectres des sources trouvées par la méthode pour obtenir une cartographie cohérente avec la référence. La figure 2.5 illustre cette application dans le cas d'une simulation correspondant au cas expérimental présenté dans le troisième chapitre.

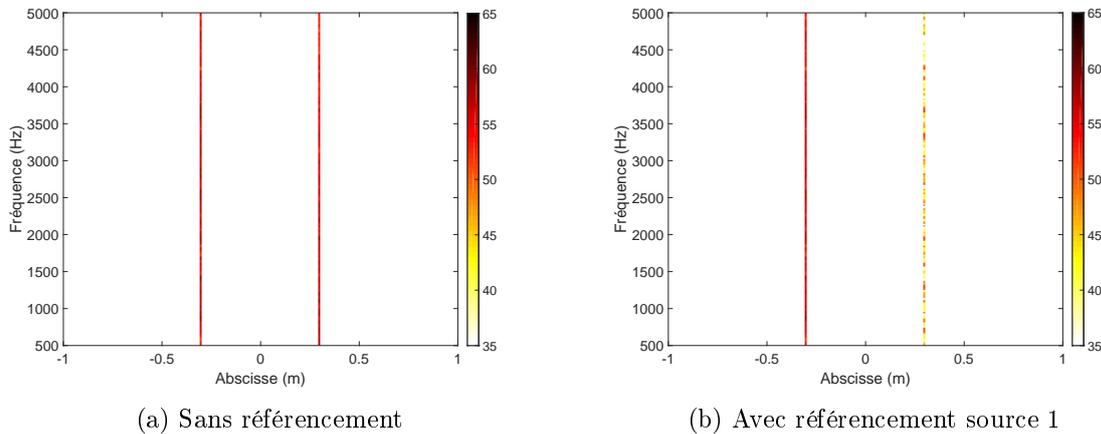


FIGURE 2.5 – Cartographie obtenue par simulation avec CLEANT sans filtre par cohérence (a) et avec filtre (b). Antenne linéaire (35 microphones, espace intercapteurs 5 cm), distance antenne-source 3 m, vitesse 50 km.h^{-1} , 2 sources de bruit blanc décorrélées de même niveau. Échelle de couleur : Niveau (dB).

La première cartographie est obtenue avec la sortie "brute" de CLEANT, tandis que la seconde est obtenue après filtrage par cohérence avec la source de gauche. Les deux sources

étant décorréliées, et disposant du signal exact de la référence, on obtient une cartographie filtrée presque parfaite de la source de gauche uniquement. Cette légère imperfection s'explique par la courte durée d'analyse pour le calcul de la cohérence dans un contexte mobile : on trouve un résultat similaire pour deux sources fixes avec une durée d'analyse identique, le résultat s'améliorant en augmentant celle-ci. Cela souligne l'une des difficultés d'appliquer des techniques faisant usage de la cohérence dans une situation de sources mobiles, puisqu'on ne dispose que de signaux de courtes durées, comme expliqué en introduction de ce chapitre.

Il est évident que des conditions idéales telles que dans la figure 2.5 ne sont pas remplies dans notre cas pratique d'application à un véhicule routier, comme cela a été détaillé au premier chapitre dans la section 1.3.1.2. Les références des signaux sources sont en particulier difficiles à obtenir, puisque nécessairement à mesurer à l'aide de capteurs embarqués. De plus, comme on l'a vu même sur un cas simple, ce type de méthodes nécessite de longues durées d'acquisition, ce dont nous ne disposons pas ici. Pour améliorer les estimateurs statistiques, il est nécessaire de réaliser un plus grand nombre de moyennes, ce qui se traduit par un plus grand nombre de snapshots d'un signal : pour un même signal, il faut donc diminuer la longueur de ces snapshots ce qui a pour conséquence de dégrader la résolution fréquentielle.

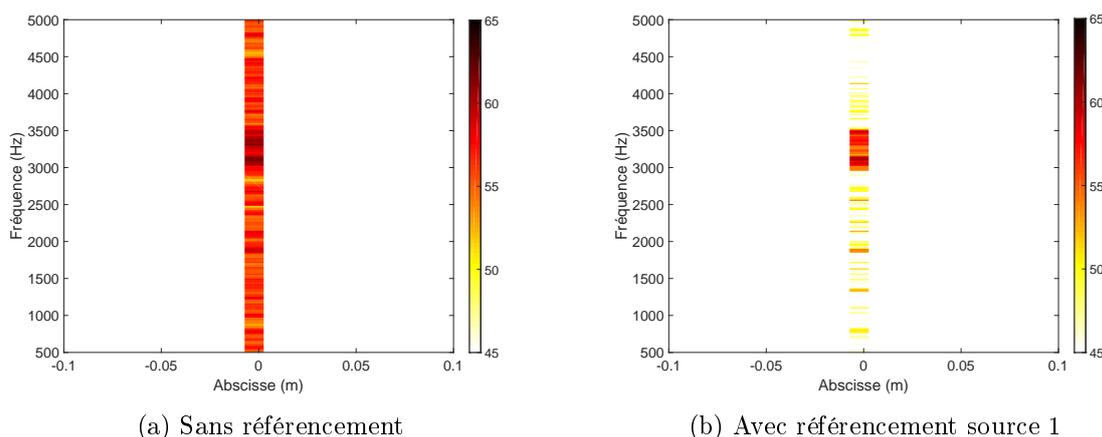


FIGURE 2.6 – Cartographie obtenue par simulation avec CLEAN sans filtre par cohérence (a) et avec filtre (b). Antenne linéaire (35 microphones, espace intercapteurs 5 cm), distance antenne-source 3 m, vitesse 50 km.h⁻¹, un bruit large bande et un bruit blanc dans la bande [3000-3500] Hz de même DSP dans la bande commune et à la même abscisse. Échelle de couleur : Niveau (dB).

De plus, des sources peuvent être étendues et rayonner sur une large zone commune à plusieurs sources voisines. On peut reprendre le cas du bruit de moteur et de roulement, qui sont rayonnés dans une zone qui comprend le passage de roue. Des stratégies proches de l'analyse spectrale conditionnée présentée en section 1.3.2.1 peuvent alors être utilisées, pour obtenir non pas une séparation de l'image des sources sur une cartographie, mais une information sur leurs contributions respectives dans une zone source donnée. Ceci est illustré dans la figure 2.6 dans laquelle les deux sources sont situées à la même abscisse 0. L'une des sources est un bruit blanc large bande, sur la totalité de la bande [500-5000] Hz, l'autre a un support fréquentiel plus réduit [3000-3500] Hz. Le filtrage permet de faire ressortir la deuxième source par exemple (fig. 2.6b),

en isolant sa contribution. Encore une fois, comme expliqué pour la figure 2.5, le filtrage n'est pas parfait car dans cette situation de source mobile, on ne dispose pas d'une durée d'analyse suffisamment longue pour avoir une estimation parfaite de la cohérence. On obtient néanmoins une information intéressante sur les contributions des sources physiques présentes sur une même zone source.

Nous reviendrons sur ces stratégies de référencement dans les troisième et quatrième chapitres qui traiteront de l'application des méthodes à des cas expérimentaux, car le choix d'un traitement par cohérence dépend grandement de la situation étudiée.

2.3 Analyse numérique comparative des performances de CLEANT

L'un des objectifs de la présente thèse est de caractériser la ou les méthodes qui auront été développées pour l'identification de sources de bruit au passage d'un véhicule routier. Une analyse numérique a donc été menée dans ce cadre afin d'éprouver les performances de deux méthodes dans les mêmes conditions de simulations : CLEANT, présentée dans ce chapitre, et MSA-PSF qui a été explicitée dans la section 1.2.3.3. Cette dernière fait en effet partie des méthodes qui ont été développées spécifiquement pour répondre au problème de la déconvolution dans une situation de sources en mouvement ; il est donc intéressant de comparer les performances de ces méthodes dans des conditions identiques.

2.3.1 Paramètres de simulation et indicateurs de performance

Les paramètres des simulations numériques ont été choisis afin de représenter un passage de véhicule routier. Afin de limiter les temps de calcul, le problème a été considéré dans le cas d'une zone source à une dimension, sans pour autant perdre en pertinence des résultats dans le cas général à deux dimensions. La configuration de test est décrite dans le paragraphe suivant et représentée dans la figure 2.7.

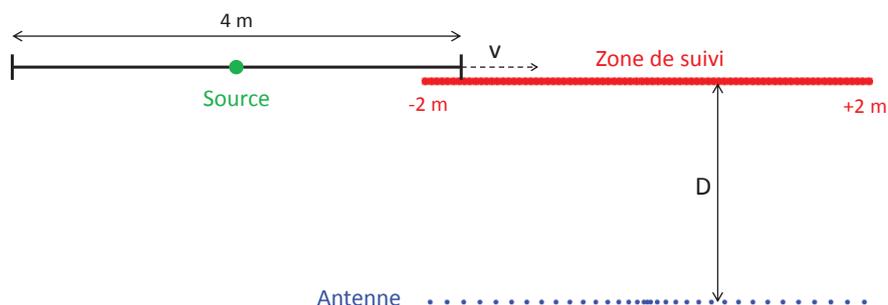


FIGURE 2.7 – Schéma de la configuration de test simulée.

Un véhicule de quatre mètres de long a été simulé, la grille-source allant des abscisses -2 m à +2 m avec un pas de 5 cm. La fréquence d'échantillonnage est $f_{\text{échantillonnage}} = 12$ kHz et la plage de fréquences étudiées s'étend de 400 Hz à 5 kHz. L'antenne linéaire a une longueur de

3,9 m et est composée de 35 microphones. L'espace intercapteurs augmente régulièrement du centre de l'antenne vers ses extrémités, avec un facteur en \log_2 : de 3 cm au niveau du centre, à 15 cm aux extrémités. Cela permet de traiter la plage de fréquences mentionnée précédemment (à 5 kHz, la demi-longueur d'onde vaut $\lambda/2 = 3,4$ cm). Ce choix de pas progressif fait écho à la discussion sur la géométrie d'antenne au premier chapitre, dans la section 1.2.2.4 : il s'agit de maximiser la plage de fréquence utile en minimisant le nombre de capteurs utilisés, et cette stratégie est souvent utilisée pour la conception d'antennes comme celle qui sera utilisée dans le quatrième chapitre.

Afin d'étudier les performances en localisation et quantification des méthodes, une source unique est considérée, située au centre de la grille-source mobile et émettant un bruit blanc gaussien. Les paramètres utilisés dans les différentes configurations sont :

- La vitesse v du véhicule.
- La distance D entre l'axe dans lequel le véhicule se déplace et l'axe de l'antenne.
- Le rapport signal-sur-bruit (RSB), en considérant un bruit blanc additif sur chaque microphone, décorrélié avec le signal source et d'un capteur à l'autre. Ce bruit n'est pas lié à une source, mais représente un bruit de mesure, tel que du vent dans les microphones.

La durée des snapshots dans la méthode MSA-PSF est fixée à 20 ms ($\Delta_f = 50$ Hz), choisie pour vérifier la condition $vT^{(e)} \ll D$ de quasi-stationnarité exprimée dans la section 1.2.3.3 pour la vitesse de véhicule la plus élevée tout en ayant une résolution fréquentielle suffisamment bonne. Le nombre total de snapshots varie en fonction de la vitesse du véhicule de 17 à 45 avec 60% de recouvrement entre eux afin de garder un intervalle de suivi de source fixe, allant des abscisses -2 m à +2 m. Cet intervalle de suivi est identique dans la phase de formation de voies avec suivi de sources de la méthode CLEANT.

Le facteur de boucle de CLEANT a été fixé à 0,7 dans la mesure où une seule source est considérée (une valeur plus faible n'améliore pas le résultat). L'interpolation utilisée pour la dédopplérisation est de type spline, et une fenêtre de type Tukey (avec un paramètre de 10%) est utilisée pour l'étape 3 de l'algorithme. Un critère d'arrêt portant sur l'énergie de la "cartographie" résiduelle a été utilisé, ainsi qu'un compteur maximal d'itérations fixé à 20. En pratique, ce nombre maximal d'itérations a toujours été atteint pour ces simulations, le critère énergétique n'étant jamais vérifié dans ce cas. Aucun filtrage n'a été appliqué dans CLEANT dans le cadre de ces simulations. Toutes les configurations de test sont résumées dans le tableau 2.1.

Des indicateurs ont été définis afin d'évaluer les performances des deux méthodes en termes de localisation et de quantification. Deux indicateurs, utilisant uniquement le point correspondant au maximum de la déconvolution, ont été rejetés à cause de leur incapacité à donner une bonne estimation de l'erreur de quantification du fait du doublement de pics lorsque la source trouvée se trouve entre deux points de la grille-source. Deux autres indicateurs, qui considèrent une zone source légèrement étendue tout en conservant une notion de compacité spatiale de l'information, sont plus précis dans leur évaluation et ont donc été retenus pour cette étude.

- Erreur de position : cet indicateur considère l'abscisse du centre de gravité de la zone source trouvée après déconvolution, prenant en compte les deux points adjacents du maximum sur la grille-source, en plus de ce dernier. Il réalise la différence entre cette abscisse estimée et l'abscisse théorique exacte de la source, pour chaque fréquence.
- Erreur de quantification : cet indicateur réalise la différence entre le niveau cumulé en énergie dans la zone source de trois points de grille-source centrée sur le maximum de

déconvolution et le niveau théorique exact de la source.

TABLE 2.1 – Configurations des paramètres de simulation.

Nom Config.	v (km.h ⁻¹)	D (m)	RSB (dB)
V30	30		
V50	50	4	Sans bruit
V70	70		
V90	90		
D3		3	
D4	50	4	Sans bruit
D5		5	
N10			10
N5	50	4	5
N0			0

Le signal source étant aléatoire, les valeurs moyennes et écarts-types de chaque indicateur ont été calculés pour une statistique sur 200 réalisations du même passage pour chaque configuration. Tandis que la valeur moyenne d'un indicateur donne une estimation de son biais, l'information sur sa dispersion est primordiale puisqu'en pratique, nous ne disposons que d'une seule réalisation d'une mesure de passage de véhicule. Par conséquent, plus cette dispersion est faible, plus l'estimation est fiable⁵.

2.3.2 Analyse paramétrique

2.3.2.1 Paramètre de vitesse

Le comportement des méthodes vis-à-vis de la vitesse du véhicule a été évalué pour une distance source-antenne de 4 mètres, et sans bruit additif sur les microphones (table 2.1). Lorsque la vitesse augmente, la durée de suivi du véhicule diminue, puisqu'elle correspond toujours à la même zone de suivi spatial. Dans le cas de CLEAN, cela peut impacter l'estimation du niveau des sources, de même que pour MSA-PSF où l'on pourra faire moins de moyennes qu'à basse vitesse (le nombre de snapshots diminue quand la vitesse augmente). De plus, la condition $vT^{(e)} \ll D$ sera d'autant mieux vérifiée à basse qu'à haute vitesse : comme précisé plus haut, la durée des snapshots permet de vérifier cette condition pour la vitesse la plus élevée de 90 km.h⁻¹ (le terme de gauche valant alors exactement un dixième du terme de droite). Il est possible qu'en approchant de cette limite, plusieurs des hypothèses de MSA-PSF qui y sont liées soient moins bien vérifiées (hypothèses 3 à 5) et que cela impacte les performances de la méthode.

Localisation

MSA-PSF présente de très bonnes performances en localisation, dans la mesure où l'erreur de position reste très faible et non biaisée (fig. 2.8a). L'écart-type de l'erreur est également faible,

5. Pour mémoire, pour une répartition gaussienne, 68% des réalisations se situent dans un intervalle à $\pm \sigma$ (écart-type) autour de la moyenne. L'intervalle de confiance à 95% a une largeur d'environ 2σ de part et d'autre de la moyenne

bien qu'il croisse à basse fréquence tout en restant inférieur à la résolution de la grille-source : cette dispersion est donc négligeable. Un point intéressant à observer est que l'écart-type de l'indicateur varie très peu en fonction de la vitesse du véhicule, c'est pourquoi seul l'écart-type correspondant à la vitesse $V = 90 \text{ km.h}^{-1}$ a été représenté dans la figure 2.8. La localisation reste donc précise et fiable pour toutes les vitesses considérées.

La performance en localisation de CLEANT est excellente à toutes les vitesses testées, puisque l'erreur moyenne est nulle quel que soit le cas considéré (les courbes sont superposées), de même que l'écart-type (fig. 2.8b). Cela permet d'avoir une bonne confiance dans le résultat obtenu par CLEANT sur une réalisation. Cette méthode obtient donc de meilleurs résultats que MSA-PSF, bien que cette dernière soit aussi très satisfaisante en localisation.

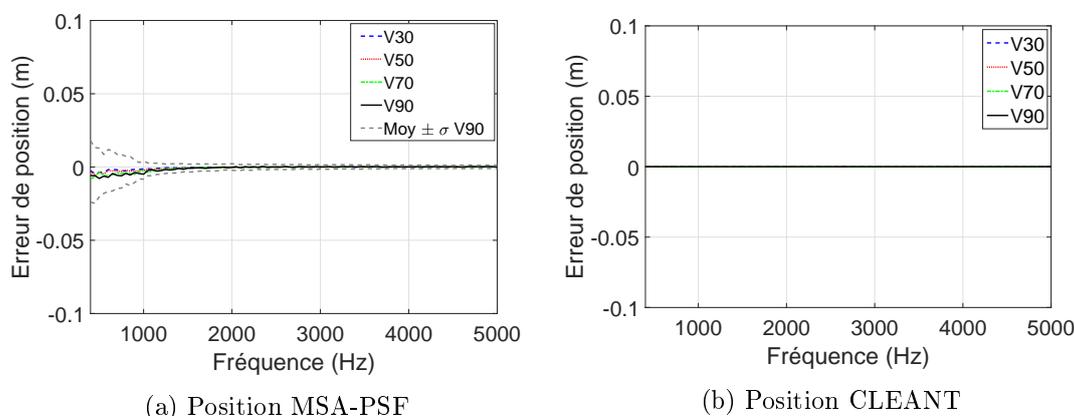


FIGURE 2.8 – Effet de la vitesse sur la localisation d'une source mobile par les deux méthodes – Lignes continues : erreur moyenne ; Ligne discontinue grise : erreur moyenne \pm écart-type à 50 km.h^{-1} . Codage des configurations selon le tableau 2.1.

Quantification

L'erreur d'estimation du niveau de la source augmente avec la fréquence dans le cas de MSA-PSF (fig. 2.9a) : limitée à 1 dB jusqu'à 3,5 kHz, on sous-estime le niveau de la source jusqu'à plus de 4 dB à 5 kHz, ce qui peut être amélioré en sur-échantillonnant les signaux temporels (mais cela augmenterait également le temps de calcul). La dispersion de l'erreur de quantification dépend fortement de la vitesse du véhicule (fig. 2.9c). Cela s'explique par le fait qu'à basse vitesse, on dispose d'un signal de durée plus longue, ce qui permet une meilleure estimation du niveau.

La quantification de la source par CLEANT (fig. 2.9b) est quant à elle très satisfaisante sur toute la gamme de fréquences étudiée. La dispersion de l'erreur de quantification dépend aussi fortement de la vitesse du véhicule (fig. 2.9d) pour la même raison que pour MSA-PSF. Cette dispersion est légèrement plus faible dans le cas de CLEANT à basse fréquence (400-1500 Hz) mais les valeurs restent comparables dans les deux cas, atteignant environ 1,2 dB dans le pire des cas (vitesse de 90 km.h^{-1}).

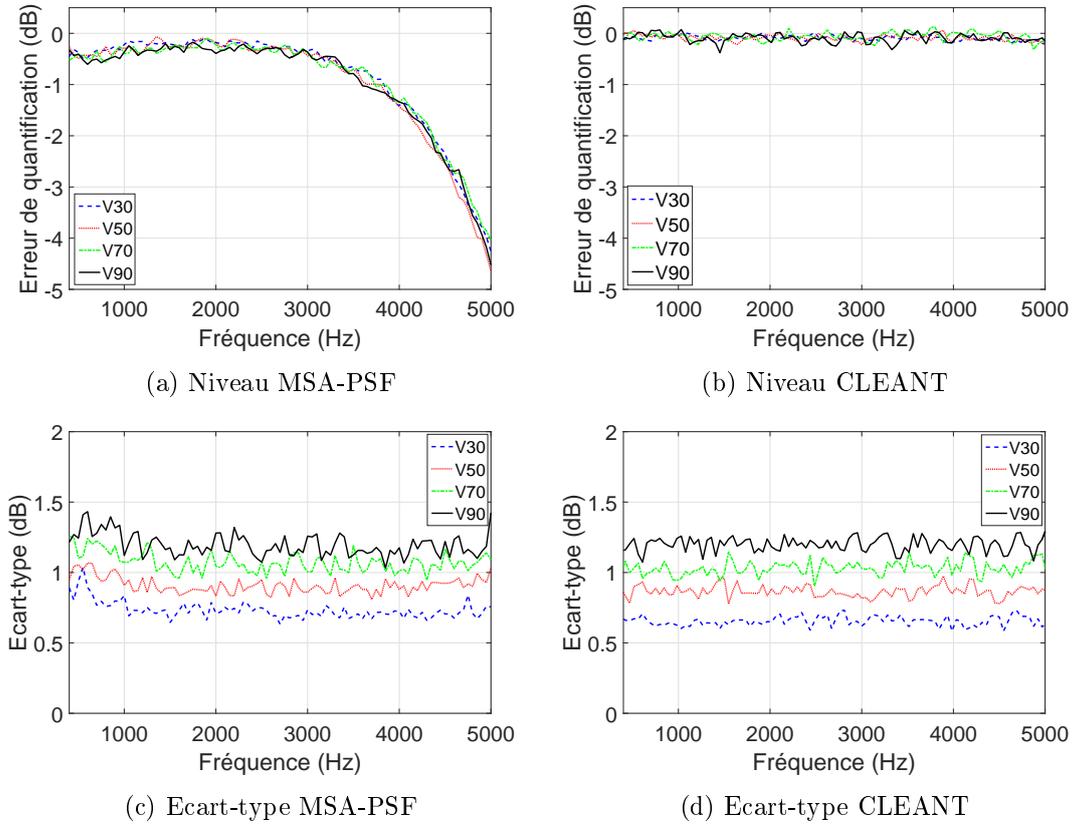


FIGURE 2.9 – Effet de la vitesse sur la quantification d’une source mobile par les deux méthodes – Haut : erreur moyenne pour chaque méthode ; Bas : écart-type. Codage des configurations selon le tableau 2.1.

2.3.2.2 Paramètre de distance

Le comportement des méthodes vis-à-vis de la distance antenne-véhicule a été évalué pour une vitesse de 50 km.h^{-1} , et sans bruit additif sur les microphones (table 2.1). Lorsque la distance varie, l’ouverture de suivi varie aussi : pour une distance plus faible, l’angle de focalisation de l’antenne en début et en sortie de zone de suivi sera plus grand que pour une distance plus grande. Cela a pour effet de dégrader la formation de voies dont le lobe principal s’élargit avec l’angle. Au contraire, lorsque la distance augmente, l’angle diminue mais la résolution relative à la grille-source diminue aussi (voir Chapitre 1 section 1.2.2.3). Ces effets se trouvent à la fois sur CLEANT et MSA-PSF, et pour cette dernière, le critère de quasi-stationnarité dépend également de cette distance et sera d’autant moins bien vérifié que la distance est courte, à durée de snapshot et vitesse de véhicule constantes.

Localisation

MSA-PSF présente toujours de très bonnes performances en localisation avec une erreur de position très faible et non biaisée, et un faible écart-type de l’erreur. De même, CLEANT est également très performante vis-à-vis de la moyenne et de la dispersion de l’erreur de position.

La figure représentant cet indicateur est similaire pour les deux méthodes à la figure 2.8, elle n'est donc pas représentée ici.

Quantification

L'erreur d'estimation du niveau de la source augmente avec la fréquence dans le cas de MSA-PSF (fig. 2.10a), les courbes étant similaires à la figure 2.9a. En revanche, la dispersion de l'indicateur ne dépend pas de la valeur de la distance entre 3, 4 et 5 m, par conséquent seul l'écart-type correspondant à la configuration de test $D = 4$ m est représenté dans la figure 2.10c. L'écart-type reste sous les 1 dB sauf à basse fréquence (inférieur à 1 kHz) où il dépasse légèrement cette valeur.

La quantification de la source par CLEAN (fig. 2.10b) est toujours très satisfaisante sur toute la gamme de fréquences étudiée. De même que pour MSA-PSF, la dispersion ne dépend pas de la valeur de la distance, et la même configuration de test $D = 4$ m est représentée dans la figure 2.10c. L'écart-type de l'erreur de quantification reste inférieur à 1 dB sur toute la gamme de fréquence, ce qui donne un léger avantage à CLEAN sur MSA-PSF à basse fréquence.

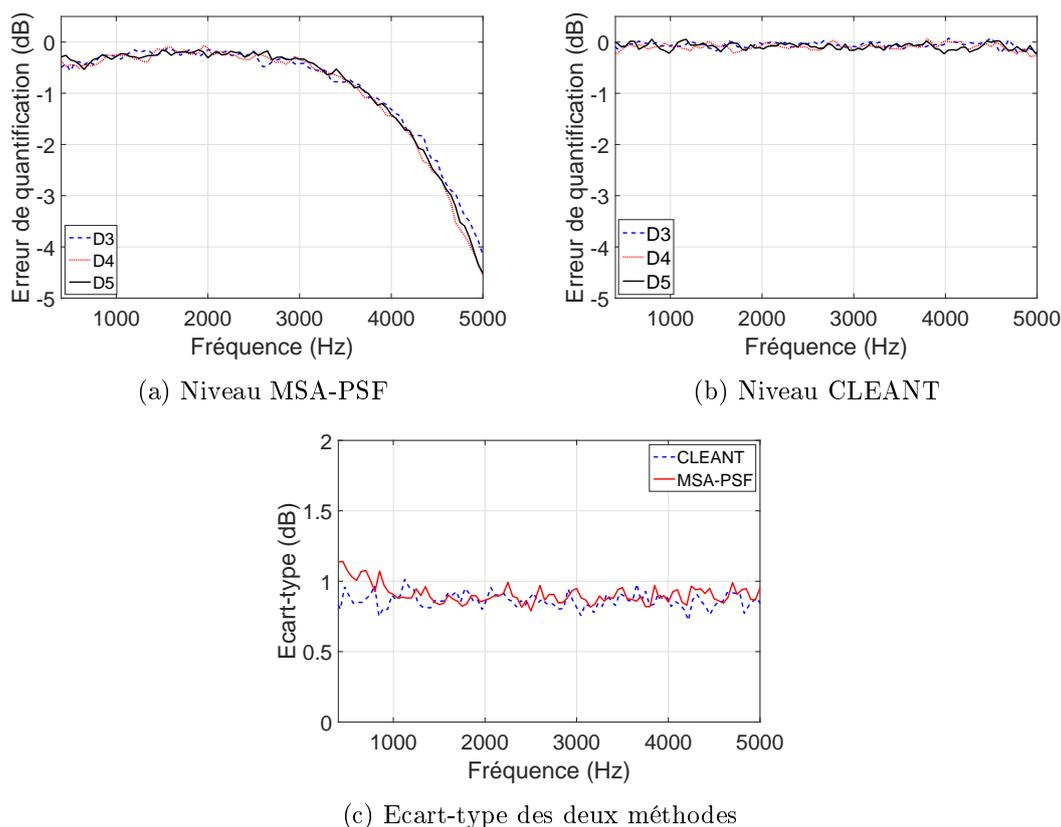


FIGURE 2.10 – Effet de la distance antenne-véhicule sur la quantification d'une source mobile – Haut : erreur moyenne pour chaque méthode ; (c) écart-type pour $D = 4$ m. Codage des configurations selon le tableau 2.1.

2.3.2.3 Paramètre de rapport signal-sur-bruit

Le comportement des méthodes vis-à-vis d'un bruit additif sur les microphones a été évalué pour une vitesse de 50 km.h^{-1} , et une distance antenne-véhicule de 4 mètres (table 2.1). Dans le cas de MSA-PSF, la présence d'un tel bruit (qui pour rappel correspond à un bruit de mesure) se traduit par l'apparition d'un terme supplémentaire dans la diagonale principale de la matrice interspectrale, ce qui perturbe l'évaluation de la formation de voies dans chaque snapshot. Du côté de CLEAN, le bruit dégrade l'interpolation réalisée pour dédopplériser les signaux lors de la formation de voies, ainsi que lors du calcul de la contribution de la source dominante à chaque itération. De plus, le caractère itératif de la méthode fait que ces erreurs se propagent et peuvent s'amplifier à chaque itération.

Localisation

Le constat vis-à-vis des performances en localisation reste le même pour une variation du rapport signal-sur-bruit (RSB) que pour une variation de vitesse de véhicule ou de distance antenne-source : CLEAN représente toujours une amélioration par rapport à MSA-PSF, avec une valeur moyenne et un écart-type de l'erreur de localisation nuls. Les performances de MSA-PSF sont néanmoins très satisfaisantes, quelle que soit la valeur de RSB considérée. Les figures ne sont donc pas représentées ici, car similaires à celles visibles dans fig. 2.8.

Quantification

MSA-PSF est peu sensible au RSB : le biais déjà constaté dans le cas non bruité reste inchangé en présence d'un bruit additif, quelle que soit la valeur de RSB testée (fig. 2.11a). La dispersion des résultats de quantification ne dépend pas fortement de la valeur de RSB, c'est pourquoi seul l'écart-type correspondant au cas le plus sévère de $\text{RSB} = 0 \text{ dB}$ est représenté (fig. 2.11c). Celui-ci reste inférieur à 1 dB sauf pour des fréquences inférieures à 1 kHz où cette valeur est légèrement dépassée.

CLEAN est en revanche bien plus impactée par ce paramètre, avec une sous-estimation du niveau d'autant plus grande que le RSB diminue, particulièrement à haute fréquence (fig. 2.11b). Comme expliqué en introduction de cette partie, un bruit additif sur les microphones dégrade l'interpolation – d'autant plus fortement à haute fréquence – dans la phase de formation de voies dans un premier temps, puis l'erreur commise est propagée et amplifiée à chaque itération. On pouvait effectivement s'attendre à une forte influence du paramètre bruit sur les performances de CLEAN. Un moyen de rendre la méthode moins sensible à la présence de bruit consiste à la fois à ajuster le critère d'arrêt, et à augmenter la fréquence d'échantillonnage. Malgré tout, la dispersion de l'erreur de quantification ne dépend pas fortement de la valeur de RSB. Tout comme pour MSA-PSF, seul l'écart-type correspondant au cas le plus sévère de $\text{RSB} = 0 \text{ dB}$ est représenté (fig. 2.11c), et reste toujours sous les 1 dB.

Il est intéressant de noter que CLEAN donne toujours de meilleurs résultats que MSA-PSF, à l'exception du cas sévère d'un RSB de 0 dB (donc autant de signal que de bruit sur le signal mesuré par les microphones). La faiblesse de la méthode soulignée dans cette configuration est donc toute relative, puisqu'elle reste plus performante que MSA-PSF dans la majorité des cas. De plus, CLEAN a également l'avantage concernant la dispersion des résultats à basse fréquence ($\leq 1 \text{ kHz}$).

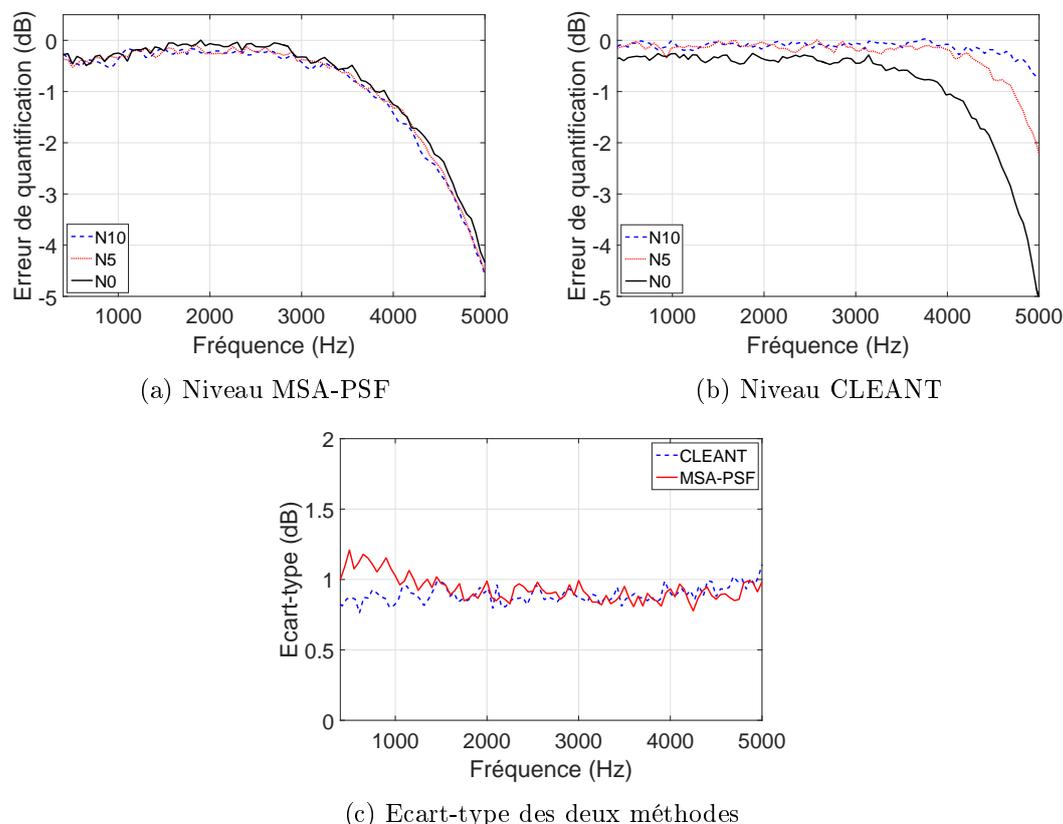


FIGURE 2.11 – Effet du RSB sur la quantification d’une source mobile – Haut : erreur moyenne pour chaque méthode; (c) écart-type pour RSB = 0 dB. Codage des configurations selon le tableau 2.1.

2.3.3 Robustesse de la méthode en cas d’écart sur les paramètres

Dans cette section, la robustesse des méthodes est évaluée dans le cas d’un écart sur les paramètres d’entrée vitesse et distance, c’est-à-dire si la valeur d’un paramètre utilisée dans la méthode diffère de la valeur réelle lors du passage du véhicule. En ce qui concerne la vitesse, deux scénarios ont été considérés : un cas sévère, avec un écart de 5%, ainsi qu’un autre correspondant à une situation expérimentale plus probable de 2% d’écart. Dans les deux cas, à la fois une sous-évaluation et une sur-évaluation ont été étudiées.

Pour ce qui est de la distance antenne-véhicule, outre une incertitude sur la mesure de la distance de passage, en pratique la véritable position des sources du véhicule n’est pas nécessairement contenue dans le plan vertical de la grille-source. Il est donc intéressant d’observer comment se comportent les méthodes lorsque la source est située en dehors du plan de la grille-source définie : CLEANT et MSA-PSF ont été évaluées lorsque la source se trouve 20 cm plus proche (respectivement plus loin) que le plan de la grille-source, soit une erreur de distance de 5%.

Dans cette partie de l’étude, un véhicule roulant à 50 km.h⁻¹ à une distance de 4 m de l’antenne et sans bruit additionnel a été simulé.

Écart sur la vitesse

Une erreur sur la vitesse implique un mauvais suivi de la source lors de la formation de voies pour CLEAN et donc une mauvaise dédopplérisation. Dans le cas de MSA-PSF, cela impacte la fonction G qui intervient à la fois dans le calcul de la PSF et de la formation de voies. De plus, la fréquence dopplérisée calculée ne sera pas exacte et cela intervient dans le calcul de la matrice interspectrale. Un écart en vitesse a donc un impact potentiel à plusieurs niveaux dans ces deux méthodes. Pour les deux méthodes, les intervalles de temps correspondant au passage d'un point focal dans la zone de suivi sont calculés en fonction de la vitesse du véhicule, par conséquent une surestimation de la vitesse conduira à considérer des durées plus faibles et une sous-estimation impliquera une focalisation à des angles plus importants et donc une dégradation de la formation de voies.

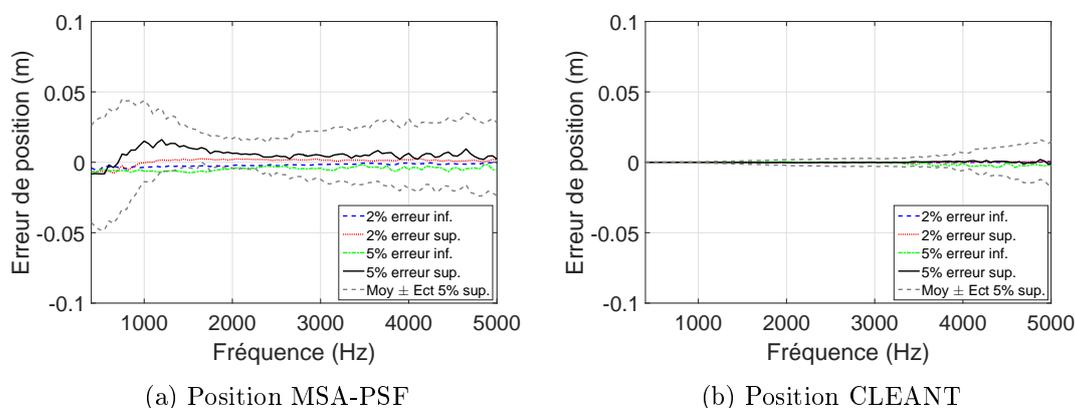


FIGURE 2.12 – Erreur sur la localisation d'une source en mouvement par les deux méthodes due à un écart sur la vitesse du véhicule – Ligne continue : erreur moyenne ; Ligne discontinue : erreur moyenne \pm écart-type pour une surévaluation de 5% de la vitesse.

Les performances en localisation de MSA-PSF sont clairement impactées dans ces conditions, que ce soit sur la valeur moyenne ou sur l'écart-type de l'erreur de position (fig. 2.12a). Il convient néanmoins de mettre en perspective cette baisse de performances, celle-ci étant surtout marquée dans le cas sévère et moins probable d'un écart de 5% sur la vitesse, la valeur moyenne atteignant au maximum 2 cm et l'écart-type ne dépassant pas 5 cm.

On constate par ailleurs que si CLEAN est peu impactée par un écart sur la vitesse en termes de valeur moyenne de l'erreur de localisation, la dispersion de cet indicateur est plus impactée à haute fréquence, tout en restant contenue sous les 2 cm (fig. 2.12b). Dans la mesure où l'origine des temps a été choisie pour correspondre au moment où le centre du véhicule se trouve face à l'antenne, la dédopplérisation est bonne lorsque le véhicule se trouve au centre de la zone de suivi, et se dégrade à mesure qu'il s'en éloigne. L'ensemble des signaux microphoniques dédopplérisés étant moyennés, la dégradation se traduit principalement par une perte de signal progressive en allant vers les bords de l'intervalle de suivi, et donc par une sous-estimation du niveau. La localisation des sources elle-même n'est ainsi presque pas affectée.

Comme attendu, l'estimation du niveau de la source est dégradée pour les deux méthodes, l'erreur de quantification augmentant avec un écart de vitesse plus élevé et sous-estimant de

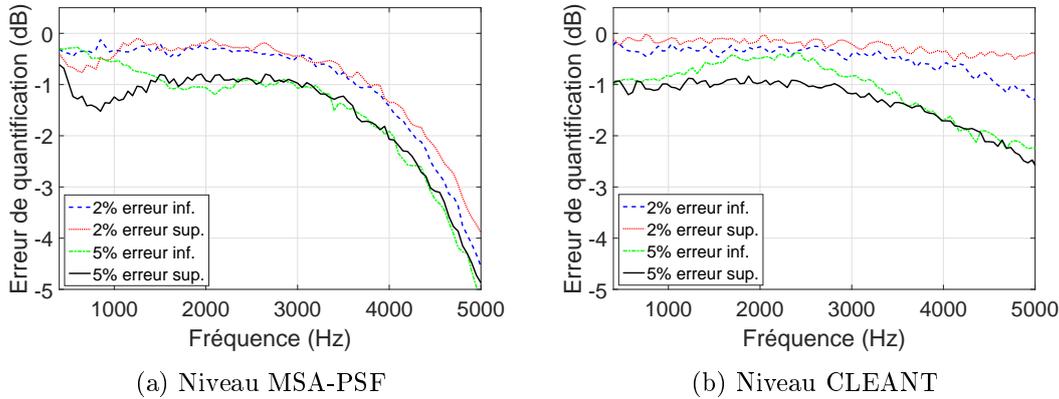


FIGURE 2.13 – Erreur moyenne sur la quantification d’une source mobile par les deux méthodes due à un écart sur la vitesse du véhicule.

manière systématique la contribution de la source (fig. 2.13). Les scénarios présentant un écart de 5% montrent que les deux méthodes requièrent une bonne connaissance de la cinématique du véhicule. Bien qu’elles soient à peu près équivalentes de 400 Hz à 3 kHz, CLEANT est néanmoins plus robuste à des fréquences plus élevées. En ce qui concerne la dispersion des résultats, l’écart-type reste aux alentours de 1 dB, excepté sous 1500 Hz pour MSA-PSF où il augmente sans toutefois atteindre 1,5 dB. La figure illustrant ces écarts-types étant similaire à la figure 2.11c, elle n’est pas affichée ici.

Écart sur la distance

Une erreur sur la distance implique également un mauvais suivi de la source. La dédopplérisation est donc affectée, que ce soit dans le cas de CLEANT ou de MSA-PSF. En outre, la compensation de l’atténuation du signal reçu par un microphone est directement impactée pour les deux méthodes. Les effets d’un écart du paramètre distance sont similaires à un écart sur la vitesse puisque ces deux grandeurs interviennent dans le calcul des distances et angles et donc dans la dédopplérisation. L’importance des dégradations constatées n’est cependant pas la même, les rôles de la vitesse et de la distance n’étant pas identiques dans les équations.

Un léger biais apparaît sur l’estimation de la position de la source à basse fréquence pour MSA-PSF, et à haute fréquence pour CLEANT (fig. 2.14). La dispersion étant négligeable pour CLEANT, elle n’est pas représentée ici, tandis que les écart-types correspondant aux deux scénarios d’erreur de paramètre distance sont représentés pour MSA-PSF (lignes discontinues).

C’est dans cette configuration que l’on observe le plus grand impact sur l’estimation du niveau de la source (fig. 2.15). En effet, si celle-ci ne se trouve pas dans le plan de la grille-source mais un peu plus proche ou plus loin, le niveau est de plus en plus sous-estimé en allant des basses vers les hautes fréquences. CLEANT est ici la méthode la plus sensible à un écart du paramètre distance et obtient de moins bons résultats que MSA-PSF. Cette dernière est également fortement impactée dans cette configuration (fig. 2.15a), ce qui indique que la formation de voies elle-même est très sensible à l’écart de distance entre la position réelle des sources et leur position supposée dans le plan de la grille-source. Les écart-types restent quant

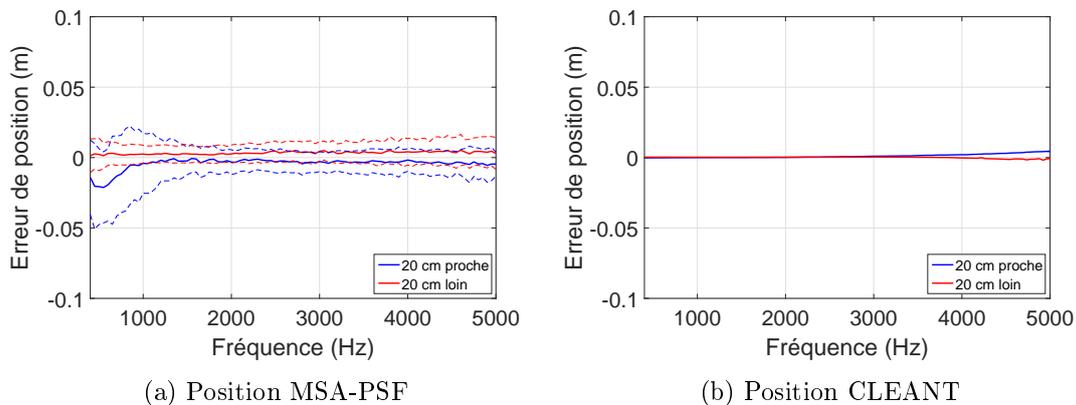


FIGURE 2.14 – Erreur sur la localisation d’une source en mouvement par les deux méthodes due à une distance antenne-véhicule erronée – Ligne continue : erreur moyenne ; Ligne discontinue : erreur moyenne \pm écart-type.

à eux inchangés quel que soit le scénario, la figure correspondante n’est donc pas incluse ici puisque similaire à la figure 2.10c.

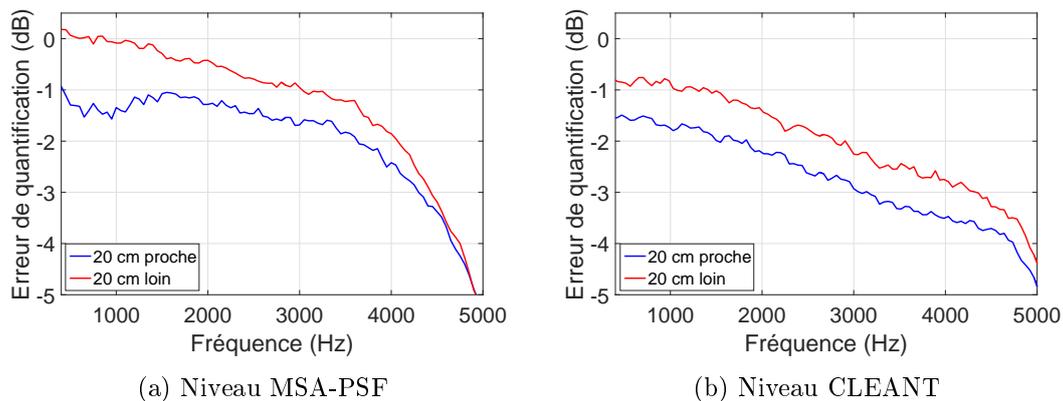


FIGURE 2.15 – Erreur moyenne sur la quantification d’une source mobile par les deux méthodes due à un écart sur la distance antenne-véhicule.

2.3.4 Séparation de deux sources proches

Comme nous l’avons vu à plusieurs reprises dans ce chapitre, la problématique de la séparation de deux sources proches est complexe pour la méthode CLEANT car elle dépend de deux paramètres et peut être résolue par filtrage selon la situation. Les deux paramètres principaux régissant le pouvoir séparateur de la méthode sont la largeur du lobe principal de formation de voies, et l’étendue du support fréquentiel des sources considérées (ainsi que la largeur de bande d’analyse choisie, s’il y a usage du filtrage fréquentiel).

Considérons uniquement la version non filtrée de l’algorithme. Comme nous l’avons illustré précédemment, CLEANT permet d’améliorer la séparation de sources par rapport à la formation

de voies à basse fréquence en utilisant l'énergie contenue dans les hautes fréquences pour localiser la source dominante à chaque itération. Par conséquent, pour des sources de bruit à largeur de bande fixée, l'écartement minimal entre ces sources pour qu'elles soient correctement séparées et localisées par la méthode dépend du contenu spectral des sources. La figure 2.16a montre, toujours dans le cas d'une simulation d'un bruit au passage de véhicule routier, l'écartement minimal entre les sources pour qu'elles soient séparées en fonction de la bande de fréquence considérée. Ces bandes couvrent la plage de 500 Hz à 5 kHz, par pas de 500 Hz.

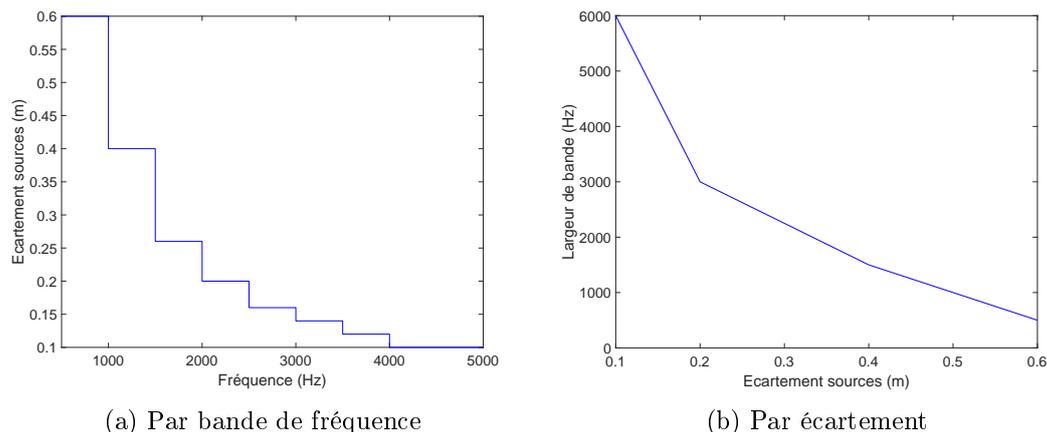


FIGURE 2.16 – Séparation de deux sources de bruit large bande proches par CLEANT : écart minimal pour une bande de fréquence donnée (a) et largeur de bande nécessaire pour un écartement donné (b). Antenne linéaire (35 microphones, espace intercapteurs 5 cm), distance antenne-source 4 m, vitesse 50 km.h⁻¹, 2 sources de bruit blanc décorréliées de même niveau.

Comme attendu, plus la bande de fréquence est située à basse fréquence, plus l'écartement minimal entre les sources est grand. En allant vers les hautes fréquences, cet écartement diminue selon une courbe exponentielle jusqu'à tendre vers une valeur limite (dans notre cas à 10 cm d'écart entre les sources). Ces écartements sont directement liés à la largeur du lobe de formation de voies, puisqu'avec une largeur de bande restreinte, on perd l'avantage de CLEANT permettant d'obtenir de l'information sur la position des sources grâce aux hautes fréquences. L'évolution de l'écartement suit d'ailleurs une courbe similaire à la largeur du lobe de formation de voies.

La figure 2.16b permet quant à elle d'observer en particulier la caractéristique de CLEANT qui améliore sa performance en localisation en utilisant l'information contenue dans les hautes fréquences. Cette fois, l'écartement des sources est fixé, et on cherche à partir de quelle largeur de bande, en partant de 500 Hz, on obtient une séparation des deux sources avec une bonne localisation. Par exemple, lorsque les sources sont éloignées de seulement 10 cm, on doit utiliser une très large bande allant de 500 Hz à 6,5 kHz. À l'autre extrémité du graphique, pour deux sources éloignées de 60 cm, une bande de largeur 500 Hz, c'est-à-dire allant de 500 Hz à 1 kHz, est suffisante pour cette tâche.

Ces figures donnent la tendance de CLEANT selon le contenu spectral des sources et leur écartement spatial. Cela permet de garder en tête que cette méthode a tout de même des limites en termes de pouvoir séparateur, d'autant plus vite atteintes que les bruits considérés manquent d'énergie en haute fréquence. Ces limites se situent au même niveau que celles de la formation

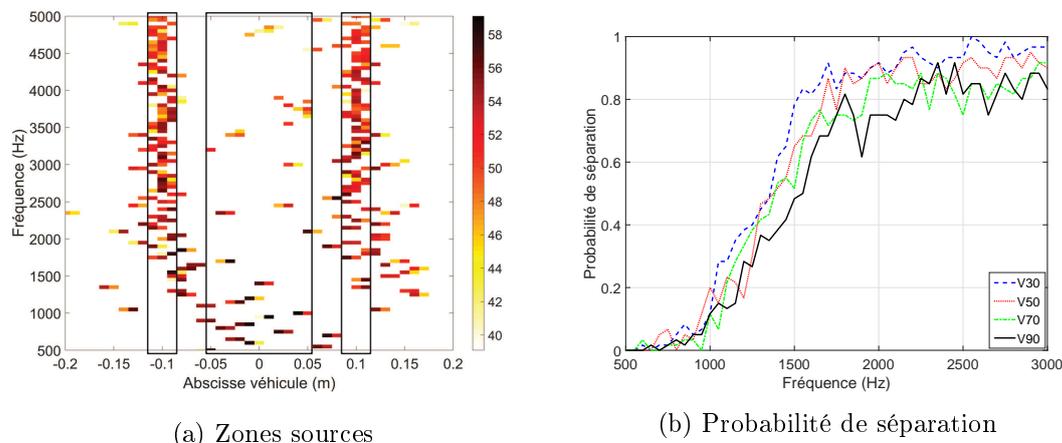


FIGURE 2.17 – Séparation de deux sources de bruit large bande proches par MSA-PSF. Antenne linéaire (35 microphones, espace intercepteurs 5 cm), distance antenne-source 4 m, vitesse 50 km.h⁻¹, 2 sources de bruit blanc décorréliées de même niveau, écartement de 20 cm.

de voies classiques. Pour aller plus loin dans la séparation des sources, on peut selon les cas opérer un filtrage fréquentiel (section 2.2.4) avec toutes les considérations qui ont été présentées précédemment, ou bien un filtrage par cohérence (section 2.2.5).

À titre de comparaison, on peut définir un indicateur de performance en séparation pour MSA-PSF, dont la nature est fondamentalement différente de CLEAN-T en cela qu'elle résout le problème d'optimisation qu'est la déconvolution, fréquence par fréquence. Cela résulte en une dispersion des sources trouvées par la méthode à chaque fréquence, comme le montre la cartographie de déconvolution 2.17a. Cette figure correspond à une simulation d'un bruit au passage d'un véhicule à une vitesse de 50 km.h⁻¹ et à une distance de 4 m de l'antenne, pour deux sources écartées de 20 cm. On peut définir trois zones principales, comme illustré sur cette figure : deux zones sources correspondant à l'abscisse théorique des sources simulées et prenant également en compte les deux abscisses adjacentes de part et d'autre de ces positions ; une zone centrale qui devrait, en théorie, ne contenir aucune source.

Le critère de séparation est binaire : pour chaque fréquence, si l'écart entre l'énergie contenue dans la zone centrale et la plus faible énergie des deux zones source est supérieur à 3 dB, alors il y a séparation. Les courbes affichées dans la figure 2.17b représentent la probabilité de séparation pour un ensemble de 200 réalisations par configuration, pour les configurations faisant varier le paramètre vitesse. On peut ainsi déterminer une limite fréquentielle sous laquelle la séparation est compromise, ici aux alentours de 2 kHz. Plus les sources sont proches, et plus cette limite se déplace à haute fréquence où la résolution est meilleure.

2.3.5 Synthèse des résultats des simulations numériques

Lors de ces simulations, on a pu constater que CLEAN-T présente de très bonnes performances tant en termes de localisation que de quantification dans la grande majorité des configurations étudiées. En effet, que le paramètre étudié soit la vitesse de la source ou bien la distance antenne-véhicule, les indicateurs montrent que l'erreur d'estimation est très faible et non biaisée pour

les deux indicateurs. Ce constat est vrai à la fois pour les valeurs moyennes des indicateurs et pour leurs écart-types. Cependant, CLEAN T s'est montré plus sensible à la présence d'un bruit additif ou à des écarts dans les paramètres d'entrée des méthodes vis-à-vis de l'estimation du niveau de la source. Cette faiblesse est néanmoins à relativiser, la méthode fournissant la plupart du temps des résultats tout à fait acceptables, à l'exception de cas très sévères.

Ces simulations numériques ont également permis de valider la possibilité d'appliquer MSA-PSF au contexte routier, qui obtient aussi des résultats intéressants, qui se dégradent généralement à haute fréquence. Sur la quasi-totalité des configurations testées, CLEAN T présente de meilleures performances que MSA-PSF. La performance en quantification de CLEAN T n'est en effet désavantagée par rapport à celle de MSA-PSF que dans le cas d'un écart du paramètre de distance antenne-véhicule.

En pratique, avec des données expérimentales, on ne dispose que d'une seule réalisation d'un passage du véhicule pour une configuration de passage donnée. En gardant à l'esprit cette contrainte expérimentale, on comprend qu'il est important que les méthodes présentent un faible écart-type dans leurs estimations de position et de niveau afin d'être proche de la valeur réelle avec une seule réalisation, ce qui est un point fort de CLEAN T. Il a également été mis en évidence qu'il est nécessaire, pour la meilleure application possible de cette méthode, de connaître précisément la cinématique du véhicule, ainsi que d'ajuster selon la situation les critères d'arrêt de l'algorithme et le facteur de boucle.

Il convient par ailleurs de rappeler un point important au sujet de la comparaison de ces deux méthodes. CLEAN T est un traitement intrinsèquement large bande dans sa version sans filtrage fréquentiel, tandis que MSA-PSF effectue une déconvolution fréquence par fréquence. Comme discuté dans la section 2.2.4.3, CLEAN T utilise l'énergie contenue dans les hautes fréquences pour compenser la mauvaise résolution de la formation de voies à basse fréquence et ainsi localiser la position de la source avec plus de précision. Cela explique les différences constatées notamment en terme de dispersion sur l'erreur de localisation mais pas uniquement : l'erreur de quantification étant évaluée avec le cumul énergétique de trois points adjacents de la grille-source, le niveau peut être sous-estimé dans le cas d'une trop grande dispersion. Cette remarque est vraie à basse fréquence, où la dispersion est importante pour MSA-PSF, mais les différences constatées à haute fréquence sont d'une nature différente dans la mesure où la dispersion diminue. La comparaison entre ces deux méthodes est donc à prendre avec un certain recul.

Le pouvoir séparateur des méthodes a également été étudié, mais la différence de nature entre les deux méthodes ne permet pas de définir un indicateur commun pour mesurer cet aspect. L'étude réalisée pour CLEAN T a illustré ses caractéristiques évoquées tout au long de ce chapitre en termes de résolution spatiale, et souligné le compromis à réaliser en cas de filtrage fréquentiel en présence de plusieurs sources proches. Un exemple d'indicateur a été donné pour MSA-PSF afin de caractériser sa performance en séparation sur une configuration de test : comme pour la formation de voies, la performance en séparation dépend de la fréquence, et il est nécessaire de considérer des zones sources étendues pour prendre en compte la dispersion des résultats obtenus, typiques d'une méthode de déconvolution.

Enfin, à l'exception de la section traitant de la séparation de sources, les cas étudiés dans ces simulations n'impliquent qu'une source unique avec l'objectif d'évaluer les performances fondamentales des méthodes dans un contexte routier. D'autres difficultés peuvent survenir avec la présence de multiples sources, et d'autres simulations devraient être menées pour affiner la

caractérisation des méthodes en explorant différents cas de figures (sources proches, corrélées et décorréées, directivités, etc.). Cette étude n'a pas été menée lors de ces travaux de thèse et constitue une perspective de travail futur. Cependant, le cas de multiples sources a été testé expérimentalement et sera présenté dans les chapitres 3 et 4.

2.4 Synthèse sur la méthode CLEAN

CLEAN est une méthode d'identification de sources opérant exclusivement dans le domaine temporel. Cette caractéristique lui permet d'être bien adaptée au cas des sources en mouvement linéaire, qui présentent des instationnarités temporelles et spatiales, là où la déconvolution demeure problématique car appliquée dans le domaine fréquentiel. Un filtrage fréquentiel peut également selon les cas améliorer sa résolution et permettre de mieux traiter les cas où la position de la source varie avec la fréquence.

Parmi ses avantages, le fait de disposer de signaux-sources temporels reconstruits en fin d'algorithme ouvre la voie à d'autres développements intéressants, notamment la possibilité d'employer des stratégies de référencement afin d'ajouter une approche "signal" à une méthode qui, autrement, serait purement géométrique. Cela laisse espérer de pouvoir différencier les contributions de sources confondues dans l'espace, telles que le bruit de roulement et celui provenant du GMP.

La validation de cette méthode a été réalisée sur des cas de simulations numériques visant à évaluer ses performances à l'aide d'indicateurs objectifs. Elle a été mise en concurrence avec une autre approche développée spécifiquement pour le traitement de sources en mouvement, MSA-PSF, initialement appliquée dans le domaine aéronautique et dont la validité dans un contexte routier a également été vérifiée par ces simulations. Cette dernière a montré de bons résultats en localisation et quantification, mais est surpassée dans la majorité des configurations par CLEAN qui offre donc des résultats prometteurs. La seule configuration plus défavorable à CLEAN qu'à MSA-PSF est l'écart de distance de la grille-source par rapport à l'antenne, entre la valeur réelle et la valeur utilisée dans la méthode : cette sensibilité est à garder à l'esprit lors de son application à des cas expérimentaux (utilisation nécessaire d'appareils de mesure de distance tels qu'un télémètre par exemple).

Les simulations n'ont certes pas couvert l'ensemble des situations possibles pour l'identification de sources, en particulier des cas de présences de plusieurs sources. Elles restent néanmoins pertinentes pour l'évaluation de performances de base sur la localisation et l'estimation du niveau d'une source en mouvement, et ont montré en particulier une faible dispersion des résultats pour CLEAN, ce qui est primordial dans une application pour laquelle une seule réalisation d'un passage est possible. Une validation expérimentale de la méthode dans un cas à plusieurs sources sera étudiée dans les troisième et quatrième chapitres, où CLEAN sera également comparée à MSA-PSF.

Application expérimentale : cas d'un pendule

Dans ce chapitre sont présentés des résultats expérimentaux obtenus avec trois différentes méthodes : la formation de voies classique avec suivi de source (notée FV), MSA-PSF et CLEAN. Il s'agit d'une première application concrète de CLEAN en conditions contrôlées, représentatives dans une version à échelle réduite d'un véhicule au passage. L'avantage de mesures de ce type est de disposer de sources connues et maîtrisées, de minimiser les perturbations apportées par l'environnement et ainsi d'assurer une certaine reproductibilité des résultats. L'applicabilité de MSA-PSF dans de telles conditions est également testée, et les résultats de ces deux méthodes sont mis en perspective avec les cartographies obtenues par formation de voies.

Sommaire

3.1	Conditions expérimentales	87
3.1.1	Montage expérimental	87
3.1.2	Configurations de test	91
3.2	Cas statique	92
3.2.1	Sources tonales	93
3.2.2	Sources large bande	93
3.3	Cas mobile	95
3.3.1	Sources tonales	95
3.3.2	Sources large bande	96
3.4	Filtrage par cohérence	97
3.5	Synthèse de l'application expérimentale des méthodes en condition de laboratoire	99

3.1 Conditions expérimentales

3.1.1 Montage expérimental

Structure du pendule

L'expérimentation s'est déroulée dans une salle semi-anéchoïque. Le dispositif expérimental est un pendule avec une tige rigide de trois mètres de long, en rotation autour d'un axe soutenu par une structure lestée (fig. 3.1). Les sources de bruit sont fixées à l'extrémité libre de la tige et oscillent avec le pendule. Un capteur optique situé près de l'axe de rotation (fig. 3.2) est utilisé pour déterminer les paramètres cinématiques du pendule (position, vitesse). Une

antenne, composée de 30 microphones régulièrement espacés de 2 cm, est disposée face au pendule (fig. 3.3). La mesure est faite sur une zone de suivi centrée sur la position au repos du pendule, position qui est utilisée comme référence pour des mesures statiques. Par conséquent, l'antenne est centrée sur cette position (le milieu de l'antenne faisant face au pendule au repos) et sa hauteur est réglée pour correspondre à l'extrémité basse de la tige où les sources sont fixées. Un microphone est également fixé à la tige à proximité de l'une des sources, afin de fournir un signal de référence pour une analyse par cohérence (fig. 3.4). Enfin, des panneaux absorbants ont été placés sur le sol entre le pendule et l'antenne pour limiter les réflexions.



FIGURE 3.1 – Pendule utilisé pour l'expérience en salle semi-anéchoïque.

Cette expérience a été pensée comme une version à l'échelle réduite d'un véhicule au passage devant une antenne linéaire. En effet, bien que le mouvement du pendule soit circulaire, par sa construction avec une tige de grande longueur par rapport aux autres dimensions du montage (intervalle de suivi, taille de l'antenne, distance antenne-source), on peut approximer sa trajectoire dans la zone de suivi de source par une trajectoire linéaire (la zone de suivi couvrant une distance d'environ 70 cm). La vitesse maximale du pendule atteinte dans cette expérience était de $3,5 \text{ m.s}^{-1}$. Par rapport à des valeurs de paramètres typiques du contexte routier, étudiés au chapitre 2 dans la section 2.3 par simulation, les facteurs d'échelle pour chaque paramètre de cette expérience sont listés dans le tableau 3.1. Le facteur d'échelle n'est pas constant selon les paramètres, car ceux-ci ont été choisis de manière à optimiser le traitement d'antenne pour ce cas particulier d'application expérimentale. Pour ce qui est de la plage de fréquence étudiée, le

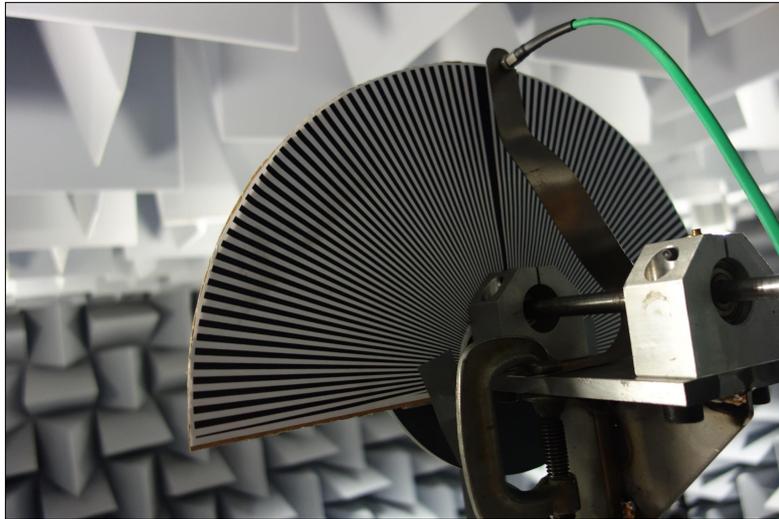


FIGURE 3.2 – Capteur optique et roue codeuse.



FIGURE 3.3 – Antenne de microphones faisant face au pendule et à la source.

paramètre "Fréquence basse" (resp. "Fréquence haute") du tableau désigne la fréquence limite inférieure (resp. supérieure) de l'intervalle de fréquence étudié.

Source de bruit

L'appareil utilisé comme source, et situé à une distance de 50 cm de l'antenne, est un smartphone équipé de deux haut-parleurs séparés de 128 mm (fig. 3.4), et qui présente plusieurs avantages pour cette expérience. Premièrement, l'appareil est à la fois générateur de signaux et amplificateur, ce qui permet de s'affranchir de toute liaison externe par câble. Deuxièmement, les deux haut-parleurs sont indépendants l'un de l'autre (standard stéréo), et peuvent délivrer

TABLE 3.1 – Facteurs d'échelle entre l'expérience du pendule et celle d'un véhicule routier.

Paramètre	Facteur d'échelle (véhicule/pendule)
Longueur d'antenne	6,5
Distance (réf. 4 m)	8
Vitesse (réf. 30/90 km.h ⁻¹)	2,5/7
Fréquence basse	1/8
Fréquence haute	1/2

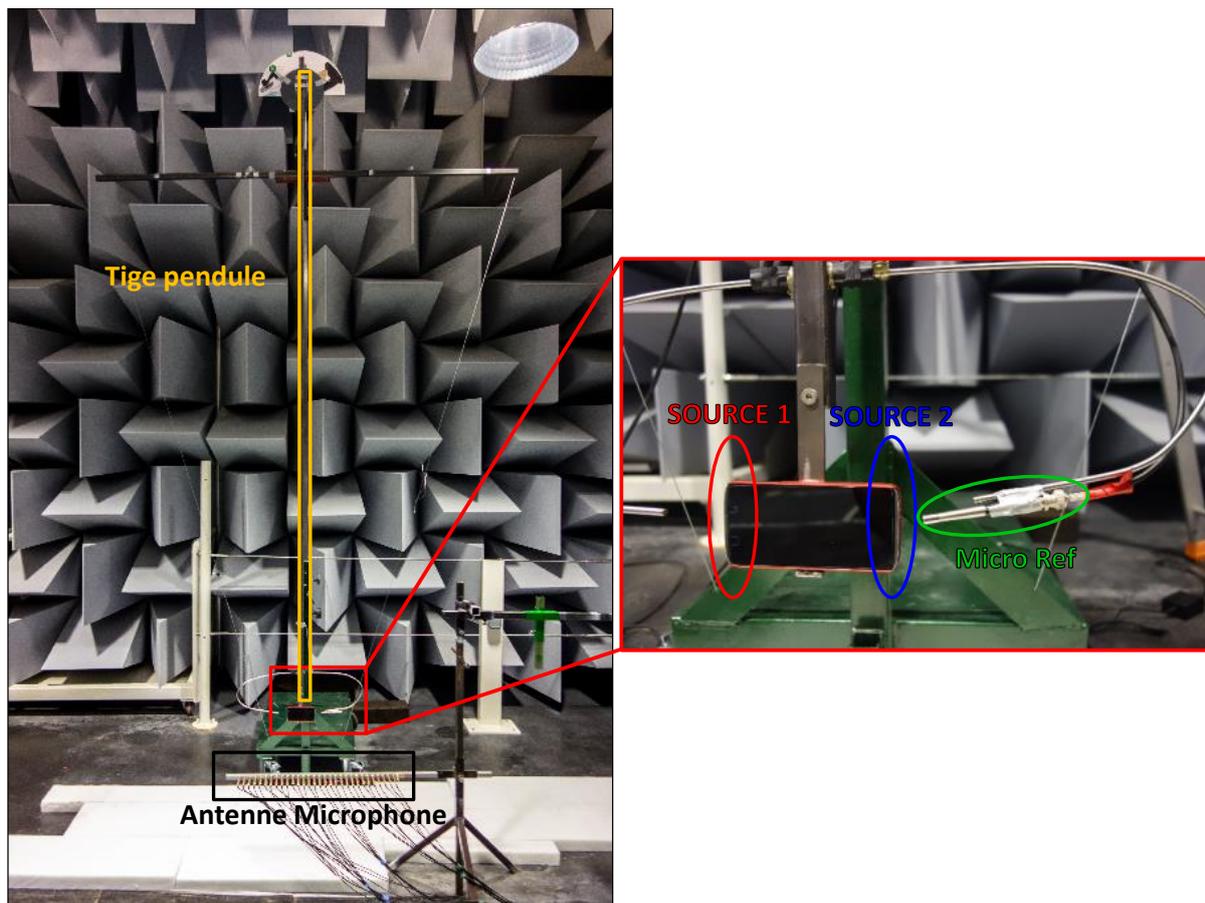


FIGURE 3.4 – Dispositif expérimental détaillé.

simultanément deux signaux différents : deux signaux tonaux à différentes fréquences, ou encore deux bruits blancs décorrélés par exemple. Enfin, le dernier avantage du téléphone est sa taille réduite, qui le rend facile à fixer à l'extrémité de la tige, ainsi que sa légèreté qui limite son influence sur le mouvement du pendule.

La réponse fréquentielle des amplificateurs et des haut-parleurs de l'appareil n'est pas neutre (fig. 3.5). Ainsi, des bruits blancs transmis au téléphone seront en sortie des bruits large bande mais non rigoureusement blancs. De plus, les haut-parleurs ne sont pas omnidirectionnels. Une

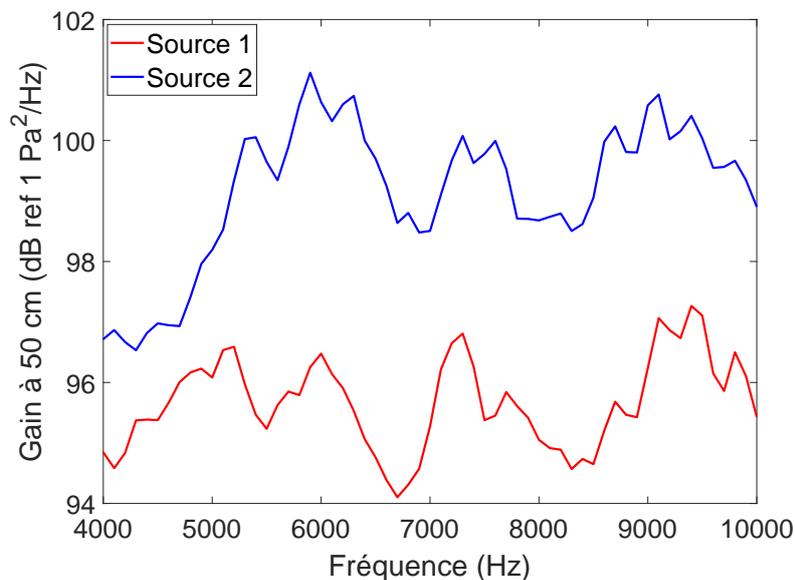


FIGURE 3.5 – Fonctions de transfert correspondant aux deux haut-parleurs de l’appareil (entrée : signal numérique source ; sortie : signal mesuré par le microphone central de l’antenne).

mesure rapide de leur directivité avec une référence à la normale au téléphone¹ (angle 90°) montre que l’on s’éloigne de l’hypothèse de source omnidirectionnelle utilisée dans les méthodes d’imagerie présentées jusqu’ici (fig. 3.6, la directivité des deux HP étant semblable, une seule directivité moyenne des deux HP a été représentée ici). Ce point sera à garder à l’esprit lors de l’interprétation des résultats de mesure.

3.1.2 Configurations de test

La procédure de test consiste à lâcher le pendule sans vitesse initiale, depuis une hauteur donnée. Deux hauteurs différentes ont été choisies pour observer des mouvements avec deux vitesses de passage différentes. Deux types de signaux ont été étudiés : signaux tonaux (à 6 kHz pour un haut-parleur et 8 kHz pour l’autre) et bruits blancs décorrélés d’un haut-parleur à l’autre. Les résultats présentés concerneront dans un premier temps la configuration du pendule au repos, pour des sources tonales puis large bande, puis la configuration en mouvement. Pour cette dernière, seule la vitesse la plus élevée sera présentée, celle-ci représentant la condition la plus difficile, et les résultats obtenus avec l’autre vitesse n’apportant pas d’information supplémentaire.

Du fait de son mouvement, le pendule n’a pas une vitesse constante, contrairement aux cas théoriques étudiés jusqu’à présent : dans la zone de suivi, la vitesse varie d’une valeur minimale de 3,33 m.s⁻¹ à une valeur maximale de 3,59 m.s⁻¹, soit une différence de 7%. Le suivi de source

1. La mesure a consisté à déplacer un microphone par angle de 15°, de 0° à 180°, à distance constante d’un HP, et de normaliser la mesure par la mesure d’un microphone fixe face au HP. Les 12 mesures ont été faites pour un HP, puis le téléphone a été retourné pour que le deuxième HP soit face au microphone de référence avant de faire 12 nouvelles mesures. Pour chaque jeu de mesures, seul le HP mesuré était actif.

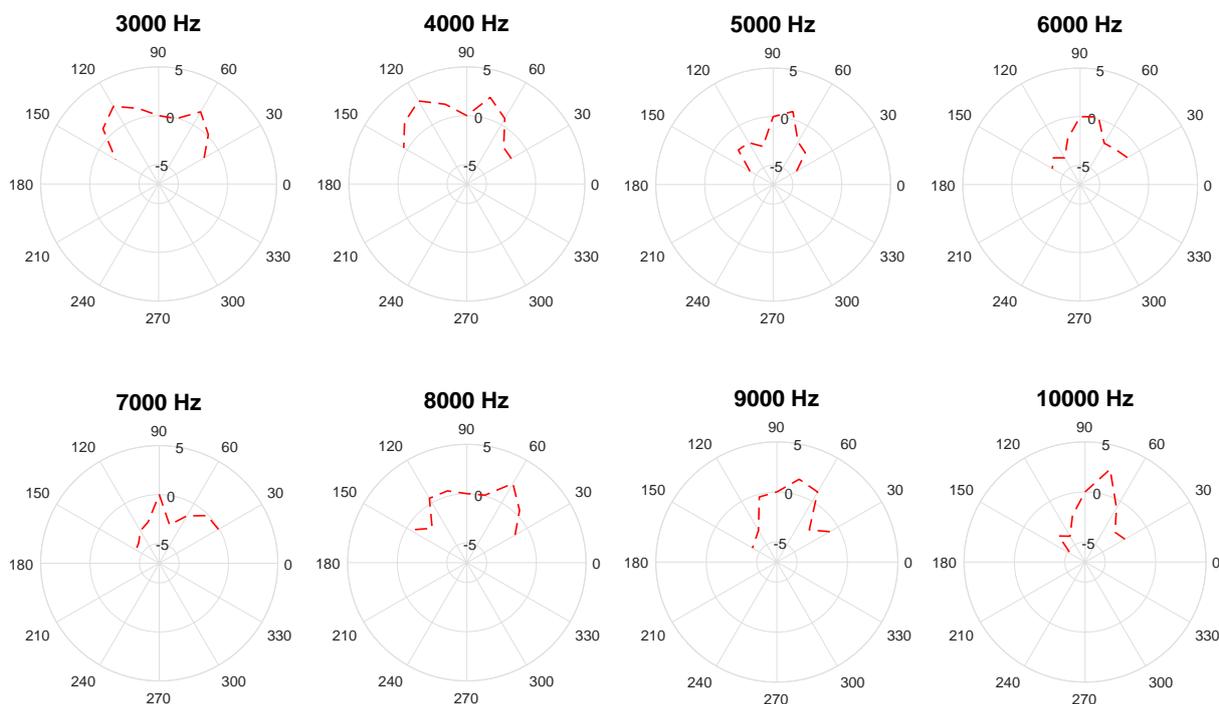


FIGURE 3.6 – Directivité moyennée sur les deux haut-parleurs pour différentes fréquences.

a donc été adapté à cette vitesse variable en calculant la position du pendule au cours du temps afin de suivre au mieux l'appareil.

Pour toutes les mesures, la longueur des snapshots pour la méthode MSA-PSF est de 20 ms, ce qui correspond à une résolution fréquentielle de 50 Hz. Le calcul a été effectué et moyenné sur 21 snapshots avec un recouvrement de 60%, soit une durée totale de signal de 200 ms. CLEANT a été implémenté sur un seul intervalle de 200 ms, de même que la formation de voies classique, notée FV pour la suite. Par conséquent, la même partie de la trajectoire a été utilisée dans tous les cas. Enfin pour CLEANT, un facteur de boucle $\gamma = 1$ a été choisi et deux critères d'arrêt ont été définis : le premier porte sur l'énergie totale de la "cartographie" résiduelle, qui doit diminuer d'une itération à l'autre ; le deuxième est un critère de convergence, qui porte sur la quantité d'énergie retirée à chaque itération, l'algorithme s'arrêtant lorsqu'elle passe sous un seuil correspondant à 0,1% de l'énergie totale initiale. Un nombre maximal de 10 itérations a également été défini.

3.2 Cas statique

Des mesures préliminaires ont été effectuées avec le pendule au repos pour obtenir une position absolue de référence des sources ainsi qu'une estimation plus précise du niveau sonore des sources. Ces résultats sont également intéressants à mettre en comparaison avec les mesures sur le pendule en mouvement pour visualiser la dégradation éventuelle du résultat due au mouvement.

3.2.1 Sources tonales

Une première comparaison entre CLEANT et MSA-PSF est faite pour des sources tonales, avec une sinusoïde de fréquence 6 kHz (resp. 8 kHz) pour le haut-parleur de droite (resp. de gauche). La formation de voies classique localise les deux sources, avec des lobes secondaires légèrement dissymétriques (fig. 3.7, lignes discontinues). Les résultats de déconvolution de MSA-PSF (fig. 3.7a) font apparaître deux sources très localisées au niveau de la position du maximum de formation de voies, de même que quelques sources secondaires parasites de niveau moindre. Les deux sources principales sont composées de deux contributions adjacentes, ce qui suggère qu'elles sont en réalité situées entre deux points de la grille-source. Dans ce cas, l'abscisse retenue pour la source correspond au centre de gravité de ces contributions et le niveau s'obtient en sommant l'énergie de ces deux contributions. Les deux sources sont identifiées avec un espacement de 126 mm, soit 2 mm de moins que l'espacement attendu de 128 mm.

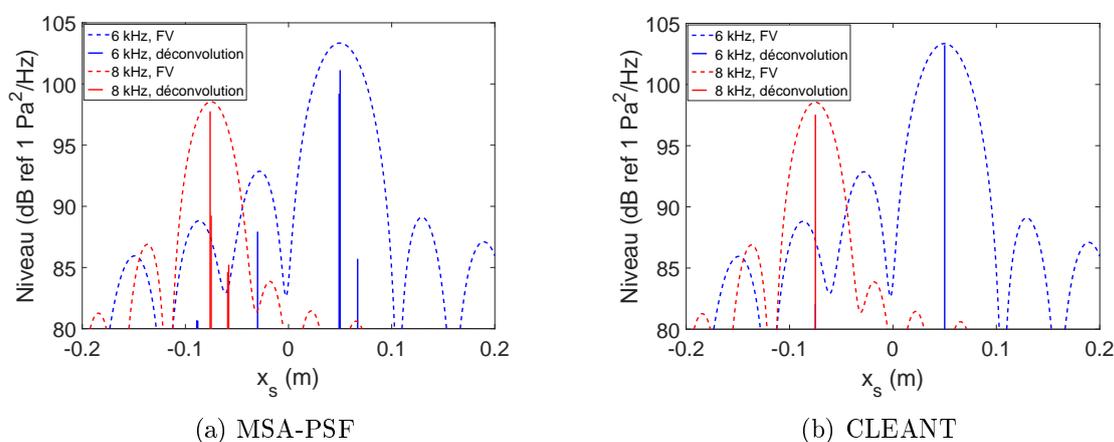


FIGURE 3.7 – Déconvolution de MSA-PSF et CLEANT pour des sources tonales fixes – Lignes discontinues : formation de voies classique (FV).

De son côté, CLEANT fournit également deux sources très localisées, mais sans source secondaire significative (Fig. 3.7b). En revanche, les deux sources sont localisées avec un écartement légèrement plus faible qu'attendu, 125 mm au lieu de 128 mm. Les différences constatées entre les résultats de MSA-PSF et de CLEANT d'une part, et la configuration attendue de deux points-sources uniques séparés de 128 mm d'autre part sont dues principalement à des inexactitudes mineures du modèle par rapport à la réalité : des réflexions sonores ainsi que la directivité des haut-parleurs peuvent engendrer des biais.

Les caractéristiques estimées des sources sont données dans le tableau 3.2, et l'on constate que les trois approches donnent des résultats très proches. L'écart de niveau entre les deux sources est conforme à ce qui est observé dans la figure 3.5.

3.2.2 Sources large bande

La comparaison suivante est faite pour des sources large bande décorréelées (génération de bruits blancs de même niveau). En raison du gain des haut-parleurs, les spectres des signaux émis ne sont plus constants sur toute la bande de fréquence. De plus, le haut-parleur de droite

TABLE 3.2 – Position et estimation du niveau des sources statiques tonales.

Méthode	Source 1 (8 kHz)		Source 2 (6 kHz)		Écart source (mm)
	Position (mm)	Niveau (dB)	Position (mm)	Niveau (dB)	
FV	-75	99	+50	103	125
MSA-PSF	-76	98	+50	103	126
CLEANT	-75	98	+50	103	125

possède une amplification avec un gain supérieur à celui de gauche, comme constaté dans le tableau 3.2 et dans la figure 3.5. Là où MSA-PSF donne des sources quasi-ponctuelles, mais avec une dispersion visible sur l'axe des fréquences (Fig. 3.8b), CLEANT identifie des sources très localisées sans ambiguïté sur leur position (Fig. 3.8c) : +46 mm et -78 mm, ce qui représente un écartement de 124 mm. On peut estimer les positions des sources trouvées par MSA-PSF à environ +46 mm et -78 mm (en moyenne sur l'ensemble des fréquences), soit le même écart de 124 mm entre elles. Le niveau sonore total sur la bande de fréquence étudiée est estimé à 72 dB pour la source de droite et 68 dB pour la source de gauche, avec chacune des deux méthodes.

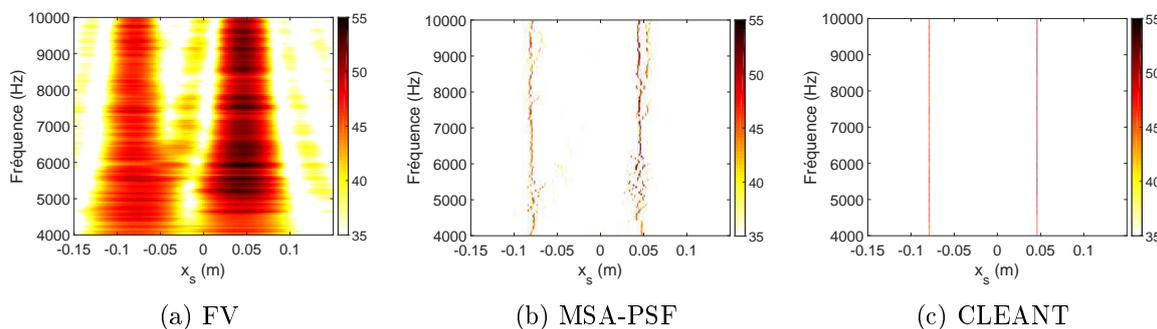


FIGURE 3.8 – Comparaison entre la sortie de FV, la déconvolution obtenue par MSA-PSF et la sortie de CLEANT pour des sources de bruit large bande statiques. Échelle de couleurs : niveau (dB).

En conclusion, CLEANT dans sa version non filtrée en fréquence donne des sources bien localisées avec peu voire pas de dispersion à la fois pour les signaux tonaux et pour les bruits large bande, et une estimation du niveau équivalente à MSA-PSF. Le seul reproche que l'on peut formuler concerne le fait que les sources sont trouvées légèrement plus proches l'une de l'autre qu'attendu : 125 mm (resp. 124 mm en large bande) pour 128 mm, soit une erreur d'environ 2% (resp. 3%). Pour les sources large bande, si l'on omet la dispersion constatée sur la cartographie obtenue par MSA-PSF, les résultats obtenus une fois des sources étendues considérées (c'est-à-dire en sommant l'énergie des sources et en prenant l'abscisse moyenne sur la bande de fréquence) sont les mêmes qu'avec CLEANT (tableau 3.3).

TABLE 3.3 – Position et estimation du niveau des sources statiques large bande.

Méthode	Source 1		Source 2		Écart source (mm)
	Position (mm)	Niv. tot. (dB)	Position (mm)	Niv. tot. (dB)	
FV	-75	68	+45	72	120
MSA-PSF	-78	68	+46	72	124
CLEANT	-78	68	+46	72	124

3.3 Cas mobile

Comme expliqué dans la procédure expérimentale, le pendule a été libéré à deux hauteurs différentes, et seuls les résultats correspondant à la vitesse la plus élevée (soit environ $3,5 \text{ m.s}^{-1}$) sont présentés ici. Pour rappel, la formation de voies classique (FV) a été implémentée dans sa version pour sources mobiles, avec suivi de source.

3.3.1 Sources tonales

On constate dans un premier temps que la sortie de formation de voies est dégradée par rapport au cas statique, avec des minima lissés (fig. 3.9, lignes discontinues). Cela est dû au fait que la procédure de suivi de sources conduit à une dédopplérisation correcte uniquement quand le point focal coïncide avec le point-source. Pour ce qui est de la déconvolution, MSA-PSF procure d'assez bons résultats (fig. 3.9a), avec deux contributions principales correspondant aux sources. Des sources secondaires sont néanmoins présentes, comme dans le cas statique, mais à des niveaux plus élevés : bien que ceux-ci soit visiblement plus faibles que le niveau des contributions principales (respectivement 7 dB et 8 dB de moins pour les sources 1 et 2), ils peuvent introduire une ambiguïté sur la position réelle des sources ou laisser penser qu'il y a des sources secondaires. Bien que le résultat soit ainsi dégradé par le mouvement, cette déconvolution demeure suffisamment bonne pour localiser et quantifier les deux sources, malgré cette ambiguïté.

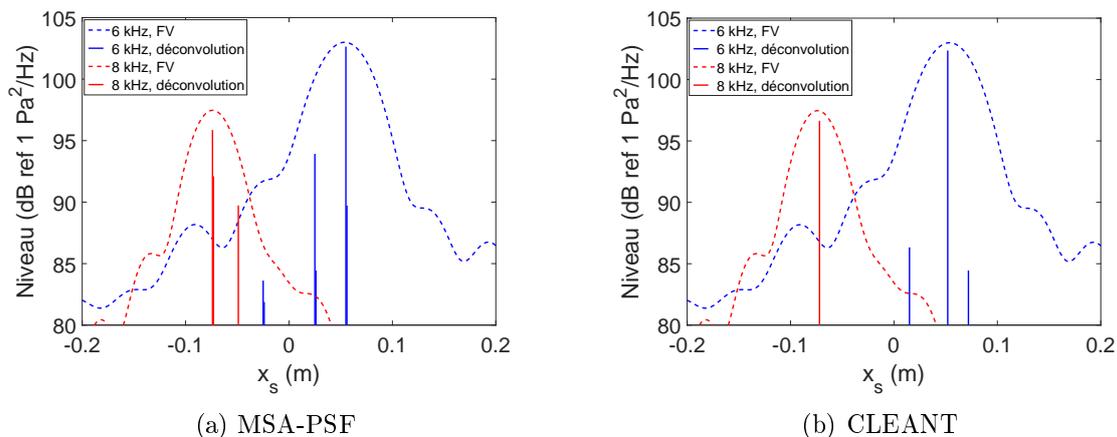


FIGURE 3.9 – Déconvolution de MSA-PSF et CLEANT pour des sources tonales mobiles – Lignes discontinues : formation de voies classique (FV).

De son côté, CLEANT identifie deux sources principales, avec deux composantes secondaires pour la source de droite, mais à des niveaux largement inférieurs (fig. 3.9b). La fréquence de la source de droite étant plus faible que celle de gauche, on comprend que l'apparition de ces parasites est due à l'étalement de la réponse d'antenne plus important à basse qu'à haute fréquence, et accentuée par le mouvement. Ces pics sont néanmoins négligeables, ne laissant pas d'ambiguïté sur la position de la source, contrairement à MSA-PSF.

TABLE 3.4 – Estimation de la position et du niveau des sources mobiles tonales.

Méthode	Source 1 (8 kHz)		Source 2 (6 kHz)		Écart source (mm)
	Position (mm)	Niveau (dB)	Position (mm)	Niveau (dB)	
FV	-74	98	+53	103	127
MSA-PSF	-74	97	+55	103	129
CLEANT	-72	97	+52	102	124

Les niveaux estimés sont légèrement inférieurs à ceux du cas statique, plus ou moins selon la source et la méthode considérée. Les caractéristiques estimées des sources sont regroupées dans le tableau 3.4. On peut remarquer que l'écartement entre les sources est de 124 mm pour CLEANT, soit 1 mm plus faible que dans le cas statique, tandis qu'il est de 129 mm pour MSA-PSF, soit 1 mm de plus que la valeur réelle.

3.3.2 Sources large bande

On constate l'effet du mouvement sur la sortie de formation de voies, qui se trouve légèrement plus étalée qu'en statique (fig. 3.10a). La cartographie de la déconvolution produite par MSA-PSF, bien qu'affichant des contributions de sources dispersées, fournit néanmoins des positions de source plus compactes que la cartographie de formation de voies (fig. 3.10b) : -74 mm et +54 mm (en moyenne sur l'ensemble des fréquences). L'écartement des sources est en moyenne de 126 mm, ce qui est légèrement inférieur à la valeur attendue.

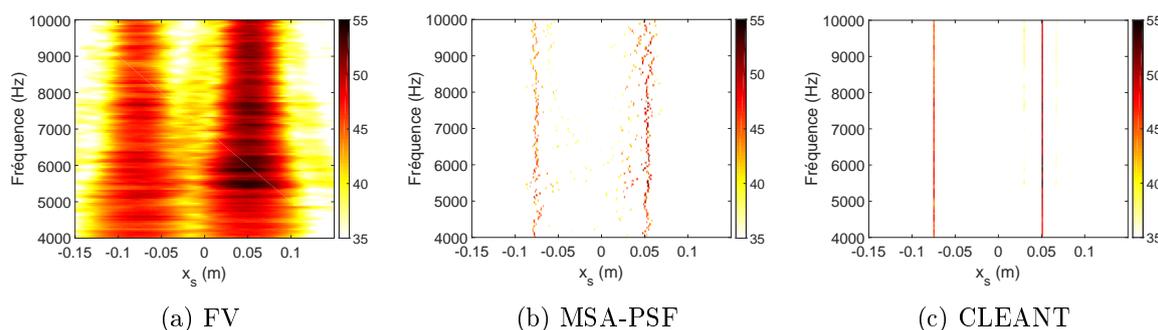


FIGURE 3.10 – Comparaison entre la sortie de CLEANT, celle de FV et la déconvolution obtenue par MSA-PSF pour des sources de bruit large bande mobiles. Échelle de couleurs : niveau (dB).

En revanche, CLEANT procure une cartographie beaucoup plus claire (fig. 3.10c), avec deux sources très bien localisées (-73 mm et +51 mm) et pratiquement aucune source secondaire n'est constatée. L'écartement entre sources est ici de 124 mm, soit la même valeur que dans le cas

statique. Le niveau sonore total sur la bande de fréquence étudiée est de 71 dB pour la source de droite et de 67 dB pour la source de gauche, à la fois pour CLEAN-T et MSA-PSF. Les niveaux sont légèrement sous-estimés par rapport au cas statique (72 dB et 68 dB).

Cette expérience avec des sources mobiles montre l'amélioration apportée par CLEAN-T par rapport à MSA-PSF : la cartographie de déconvolution est précise et donne une position sans ambiguïté des sources. Cependant, comme cela a été remarqué dans le deuxième chapitre, la comparaison entre les deux méthodes n'est pas tout à fait équitable, du fait de la différence fondamentale entre leurs philosophies. Ce point sera discuté dans la conclusion de ce chapitre.

TABLE 3.5 – Position et estimation du niveau des sources mobiles large bande.

Méthode	Source 1		Source 2		Écart source (mm)
	Position (mm)	Niv. tot. (dB)	Position (mm)	Niv. tot. (dB)	
FV	-71	68	+49	72	120
MSA-PSF	-73	67	+53	71	126
CLEAN-T	-73	67	+51	71	124

3.4 Filtrage par cohérence

La possibilité d'utiliser les signaux-sources temporels reconstruits par formation de voies pour diverses applications est un des points forts de CLEAN-T. L'application la plus évidente est la création d'une cartographie acoustique représentant le niveau des sources et leur position, comme ce qui a été présenté jusqu'à présent. On peut également utiliser un signal de référence pour calculer sa cohérence avec les signaux reconstruits, afin de filtrer cette cartographie, comme cela a été évoqué dans le deuxième chapitre, dans la section 2.2.5. On peut tester ici l'application d'une telle démarche dans des conditions de laboratoire, dans le cas de sources aléatoires large bande décorréelées. Un microphone de référence a été placé à proximité directe de la source de droite (fig. 3.4). Les matrices de cohérence entre ce signal de référence et les signaux-sources reconstruits, obtenues pour le cas statique et pour le cas mobile, sont représentées dans la figure 3.11.

On peut observer que le passage du cas statique au cas mobile introduit une dégradation de la mesure de cohérence. Dans une situation idéale, la cohérence devrait valoir 1 pour la source de droite sur l'ensemble de la gamme de fréquence étudiée, et 0 partout ailleurs puisque les deux sources sont décorréelées. Le cas statique s'en rapproche, avec une cohérence supérieure à 0,9 sur l'ensemble de la gamme de fréquence pour la source de droite (fig. 3.11a). En revanche, on trouve des valeurs non nulles – bien que faibles – pour la source de gauche, ce qui peut avoir plusieurs origines : étant donné sa disposition, le microphone de référence peut capter une partie du signal de la source de gauche, ou encore la reconstruction des signaux dans CLEAN-T peut ne pas être parfaite, en particulier des lobes secondaires de la source de gauche peuvent se trouver dans le lobe principal de la source de droite lorsque l'antenne est focalisée sur cette dernière, ce qui détériore la reconstruction. De plus, le calcul de la cohérence implique des moyennes statistiques, et se trouve donc amélioré lorsqu'on dispose de signaux plus longs. Ici la cohérence est évalué dans les cas mobile comme statique sur 200 ms, correspondant à la durée de suivi du cas mobile,

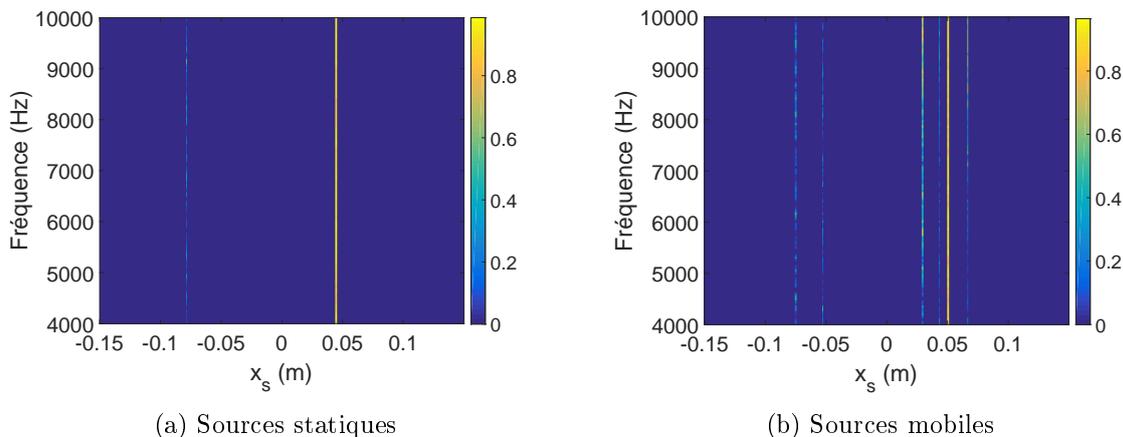


FIGURE 3.11 – Matrices de cohérence entre le signal de référence et les signaux-source reconstruits pour une mesure statique (a) et mobile (b).

et une durée plus longue dans le cas statique permet d'améliorer un peu la cohérence.

Dans le cas mobile, on note une cohérence non nulle à différentes abscisses : cela correspond aux sources secondaires trouvées par CLEAN pour des sources en mouvement dans cette expérience. Celles-ci ne sont pas forcément visibles dans les cartographies, du fait de la dynamique choisie (20 dB). On trouve néanmoins une cohérence élevée à l'abscisse de la source de droite, et faible ailleurs, ce qui permet d'envisager un filtrage direct tel que mentionné dans le premier chapitre dans la section 1.3.2.2, en particulier de manière analogue à Guidati et Sottek [Guidati et Sottek 2008, Guidati 2009]. Cette application permet de passer de la figure 3.12a à la figure 3.12b.

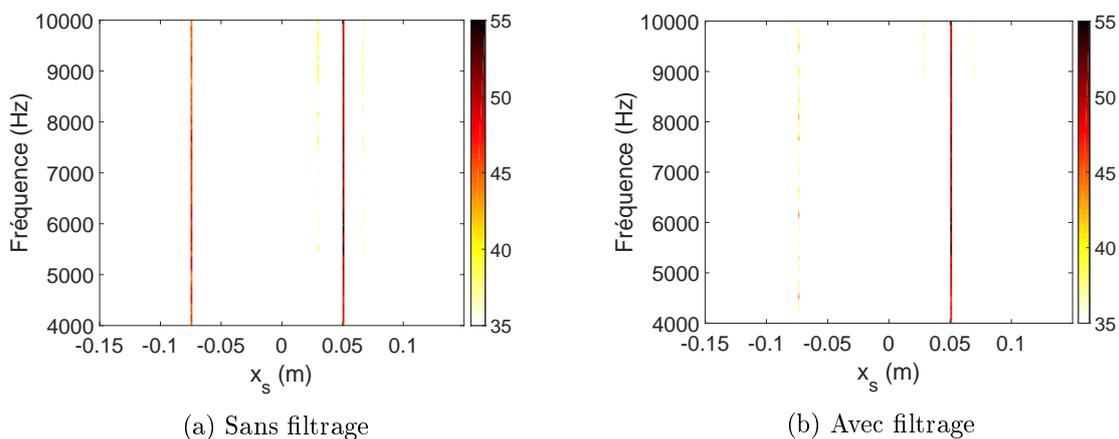


FIGURE 3.12 – Cartographie obtenue par CLEAN pour des sources mobiles, sans filtrage (a) et avec filtrage par cohérence avec la source de droite (b). Échelle de couleurs : densité spectrale de puissance cohérente (dB).

En gardant la même dynamique de 20 dB, on constate qu'on a pratiquement "nettoyé" la cartographie de la contribution de la source de gauche en appliquant ce filtrage par cohérence.

Cela est rendu possible par les conditions expérimentales favorables : les bruits d'origine sont décorrélés, les sources ne sont pas trop proches l'une de l'autre vis-à-vis de la résolution spatiale de la formation de voies aux fréquences étudiées, et l'environnement de mesure est peu susceptible de faire diminuer la cohérence entre la référence et les signaux reconstruits (bruit de fond très faible). De plus, le signal de référence est aisément obtenu par la mesure grâce à un accès direct aux sources. Si certaines applications pourraient bénéficier d'une telle utilisation de ce filtrage, il faut garder à l'esprit que dans le cas d'une application aux véhicules routiers, de telles conditions ne peuvent être réunies aussi parfaitement.

3.5 Synthèse de l'application expérimentale des méthodes en condition de laboratoire

Ce montage expérimental simple a permis une première application de CLEAN-T sur un cas réel, ainsi que de tester MSA-PSF en conditions réelles pour identifier des sources en mouvement dans une version à l'échelle réduite d'un véhicule routier au passage. L'utilisation d'un pendule à tige longue permet d'obtenir un mouvement quasi-linéaire sur un intervalle de suivi de petite taille par rapport à la longueur de la tige, et le dispositif équipé de deux haut-parleurs indépendants fournit deux signaux simultanément. Bien que les deux sources ainsi créées soient relativement espacées, par rapport à la résolution spatiale de la formation de voies pour les fréquences étudiées, il s'agit d'un cas à deux sources qui permet de souligner d'éventuelles difficultés des méthodes, notamment lorsque celles-ci émettent des bruits large bande.

Il est intéressant de faire un parallèle avec l'étude sur les incertitudes menée dans les simulations. En effet, malgré les conditions contrôlées de l'expérience, certaines incertitudes sur la connaissance des valeurs des paramètres sont présentes lors de l'application des méthodes. Tout d'abord, le pendule peut avoir du jeu lors de son mouvement, sa trajectoire n'est donc pas forcément contenue dans le plan attendu. Par conséquent, il existe une incertitude sur la distance entre l'antenne et les sources, comme cela a été étudié en simulation dans le deuxième chapitre, section 2.3.3. On peut estimer ce jeu comme étant au maximum de l'ordre de 1 cm, à comparer à la distance de 50 cm entre les sources et l'antenne lorsque le pendule est au repos. Cela représente une erreur potentielle de 2%, là où l'erreur étudiée en simulation était de 5% (20 cm pour une distance de 4 m). Ensuite, il existe une incertitude sur la valeur de la vitesse mesurée, due à sa mesure par le système optique via l'angle du pendule, de l'ordre de 4%. En se référant à l'étude en simulation du deuxième chapitre, on se rend compte que de tels écarts potentiels peuvent être à l'origine de la sous-estimation du niveau des sources observée dans le cas mobile par rapport au cas statique.

Les performances de CLEAN-T dans ce contexte expérimental sont très encourageantes, tant au niveau de la localisation que de la quantification des sources. Les résultats obtenus sont globalement meilleurs que pour MSA-PSF, malgré une tendance à trouver les sources avec un écartement légèrement trop faible. On a pu constater que les niveaux sont légèrement sous-estimés dans le cas mobile par rapport au cas statique, que ce soit pour CLEAN-T ou MSA-PSF. L'avantage de CLEAN-T est de proposer des sources principales avec peu de sources secondaires parasites, et lorsque c'est le cas à des niveaux notablement inférieurs. Cela permet d'identifier sans ambiguïté les sources réelles, tandis que MSA-PSF fournit des sources avec une dispersion

certaine dans le cas de bruits large bande.

Il est important néanmoins de nuancer ce dernier point. En effet, comme cela a été mentionné à plusieurs reprises, les philosophies de CLEAN-T et de MSA-PSF sont fondamentalement différentes. En particulier, CLEAN-T résout le problème d'identification des sources dans le domaine temporel en traitant toutes les fréquences en même temps, tandis que MSA-PSF est une méthode qui opère uniquement dans le domaine fréquentiel, et qui doit traiter le problème fréquence par fréquence. Dans CLEAN-T, l'ensemble de l'énergie des signaux en sortie de formation de voies est utilisé pour déterminer la source dominante à chaque itération, en particulier l'énergie contenue dans les hautes fréquences qui bénéficient d'une meilleure résolution de la formation de voies que les basses fréquences. La localisation de la source est par conséquent rendue plus précise, ce qui n'est pas le cas de MSA-PSF qui traite chaque fréquence indépendamment des autres. La comparaison entre ces deux méthodes de natures différentes est donc à prendre avec précaution : bien que la finalité soit la même, à savoir estimer la position et le niveau des sources, le résultat obtenu est subordonné aux hypothèses des méthodes. En particulier pour CLEAN-T, dans le cas où une source se trouverait perturbée dans les hautes fréquences par une source voisine, l'avantage apporté par les composantes haute fréquence du signal pourrait devenir un handicap et fausser la localisation sur l'ensemble du support fréquentiel de la source. Cette problématique a été abordée dans le deuxième chapitre pour justifier l'utilisation d'un filtrage fréquentiel dans l'algorithme de CLEAN-T : selon la situation, on pourrait donc avoir recours à cette version particulière de CLEAN-T et observer des dispersions d'une bande de fréquence à une autre, se rapprochant du type de résultat obtenu avec MSA-PSF. La figure 3.13 illustre le genre de résultat que l'on obtient sur le cas expérimental du pendule en mouvement lorsqu'on utilise la version avec filtrage fréquentiel de CLEAN-T : en utilisant des bandes de fréquence de plus en plus petites, on se rapproche du cas et des résultats de MSA-PSF.

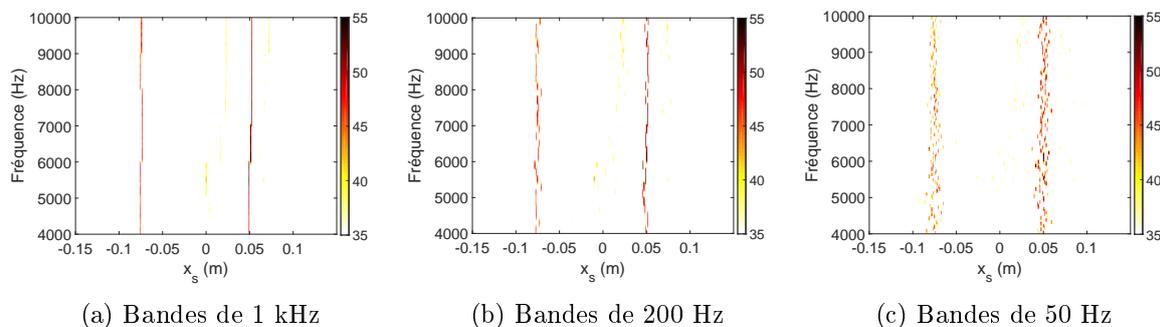


FIGURE 3.13 – Cartographie du pendule en mouvement obtenue par CLEAN-T avec un filtrage par bandes de fréquence de 1000, 200 et 50 Hz. Échelle de couleurs : niveau (dB).

Un des aspects les plus intéressants de CLEAN-T a également pu être testé, à savoir la disponibilité des signaux-sources temporels reconstruits. L'application d'un filtrage par cohérence à l'aide d'une mesure de référence par un microphone à proximité immédiate d'une des deux sources permet d'obtenir une cartographie cohérente avec cette source, ne faisant apparaître que sa contribution et masquant celle de l'autre. Malgré les conditions expérimentales contrôlées, on constate cependant que la cohérence calculée entre la référence et les signaux-sources reconstruits n'est pas rigoureusement égale à 1 pour la source correspondant à la référence, et 0 en dehors :

cela laisse penser que l'application d'un filtrage aussi direct sera à considérer avec beaucoup d'attention dans un cas expérimental plus complexe, tel que le passage d'une voiture. Il s'agit malgré tout d'une caractéristique intéressante pour CLEAN-T dans le cadre d'autres applications sur sources mobiles.

Enfin concernant le temps de calcul nécessaire sur un ordinateur portable de calcul standard, l'application des méthodes pour des sources mobiles tonales a duré 85 s avec la formation de voies, 120 s avec CLEAN-T (en 5 itérations) et seulement 40 s avec MSA-PSF, puisque seules les deux fréquences d'émission sont sélectionnées pour le calcul. En revanche, dans le cas de sources de bruit large bande, alors que la formation de voies et CLEAN-T gardent le même ordre de grandeur (respectivement 87 s et 130 s en 5 itérations), MSA-PSF devient plus long puisque chaque fréquence étudiée doit être traitée séparément : 1400 s. A noter que la version filtrée en fréquence de CLEAN-T augmente son temps de calcul, mais pas de manière considérable en fonction du nombre de bandes de fréquence considérées (150 s pour 9 bandes, 170 s pour 41 bandes et 350 s pour 161 bandes). En considérant uniquement le coût en temps, il est clair qu'une méthode opérant exclusivement dans le domaine fréquentiel telle que MSA-PSF est avantagée pour une étude mono-fréquentielle ou bien dans des bandes de fréquence étroites. Au contraire, pour l'application à des sources de bruit large bande, des méthodes opérant dans le domaine temporel telles que la formation de voies ou CLEAN-T sont avantagées, puisqu'elles traitent l'intégralité des fréquences en même temps.

Analyse expérimentale : bruit au passage d'un véhicule

Ce chapitre présente une expérience en conditions réelles sur l'émission de bruit au passage de véhicule routier. Cette expérience a permis de tester les performances des méthodes présentées dans ce document dans le contexte qui représente l'objectif principal de la thèse. Une source sonore (dite source B&K dans ce chapitre) a été rajoutée sur le véhicule afin de disposer d'un signal maîtrisé pour valider les méthodes, avant de chercher à identifier les sources propres au véhicule. De plus, afin de tester des méthodes de séparation de sources par référencement telles que décrites dans le premier chapitre (section 1.3) et couplées à CLEANT, des capteurs embarqués ont été disposés à proximité directe de certaines sources pour enregistrer des signaux de référence. Différentes configurations de passage ont été réalisées afin de couvrir une large plage de fonctionnement. Le dispositif expérimental et les configurations de passage sont présentés avant les résultats des méthodes sur certaines configurations sélectionnées.

Sommaire

4.1	Conditions expérimentales	104
4.1.1	Montage expérimental	104
4.1.1.1	Véhicule et capteurs embarqués	104
4.1.1.2	Antenne de microphones et équipement en bord de piste	104
4.1.2	Source sonore contrôlée	107
4.2	Paramètres des méthodes	109
4.3	Mesure statique	110
4.3.1	Configurations de mesure	110
4.3.2	Résultats de mesure	113
4.3.3	Bilan de la mesure statique	117
4.4	Mesure au passage d'un véhicule	118
4.4.1	Configurations de passage	118
4.4.2	Résultats de mesure avec la source contrôlée	118
4.4.3	Résultats de mesure sans la source contrôlée	124
4.4.4	Bilan de la mesure au passage	127
4.5	Utilisation des signaux de référence pour la séparation de sources	128
4.5.1	Cas statique : zone du passage de roue	128
4.5.2	Cas mobile	134
4.5.3	Bilan du référencement pour la séparation de sources	139
4.6	Synthèse de l'application des méthodes en conditions réelles	139

4.1 Conditions expérimentales

4.1.1 Montage expérimental

4.1.1.1 Véhicule et capteurs embarqués

Le véhicule sélectionné pour cette expérience est une voiture Renault Scenic, avec un moteur essence (fig. 4.1). Ce véhicule présente l'avantage d'être aménagé pour des mesures embarquées, avec notamment un système de fixation pour des microphones à proximité de la roue arrière droite (fig. 4.2a). Une source sonore embarquée est fixée à l'arrière du véhicule et sa sortie est déportée à l'aide d'un flexible. L'extrémité du flexible est quant à elle située sur le toit de la voiture (fig. 4.1), le point d'émission de la source se trouvant ainsi éloigné des principales sources propres au véhicule pour faciliter sa localisation et quantification. Un microphone est fixé à la sortie du flexible afin d'enregistrer le signal rayonné par la source (fig. 4.2b).

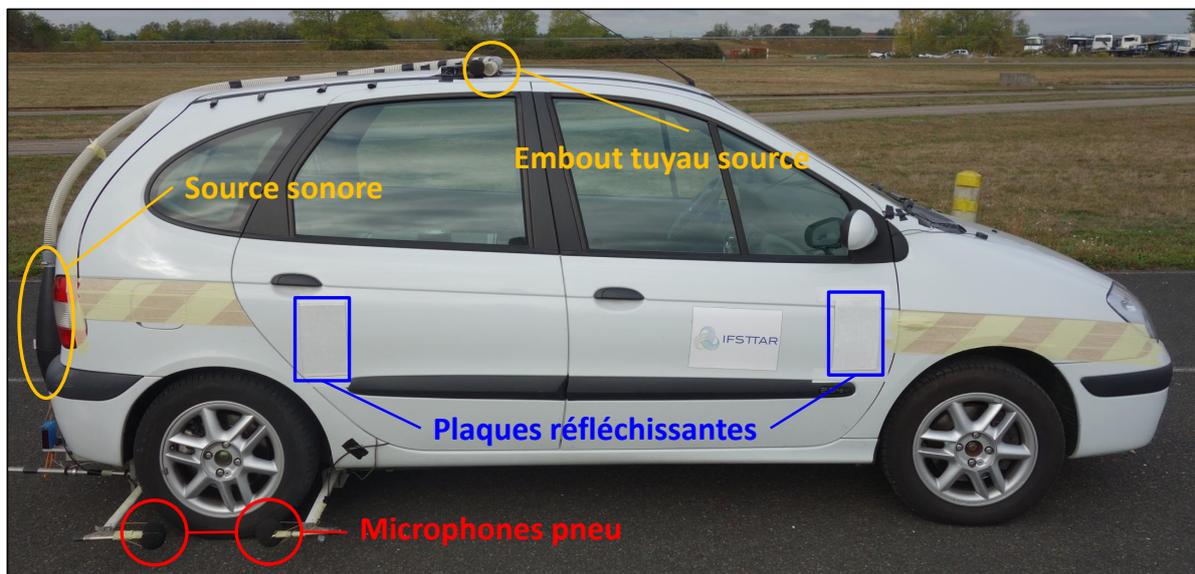


FIGURE 4.1 – Véhicule de test équipé.

Deux plaques réfléchissantes sont fixées sur le flanc de la voiture (fig. 4.1) pour la détection du véhicule par une cellule photoélectrique en bord de piste : le signal provenant de cette cellule est utilisé pour mesurer la vitesse du véhicule au passage. Enfin, trois accéléromètres et un microphone sont placés dans le compartiment moteur pour obtenir des signaux de référence (fig. 4.3).

L'ensemble des équipements embarqués est listé dans le tableau 4.1.

4.1.1.2 Antenne de microphones et équipement en bord de piste

Pour cette expérience, une antenne à deux dimensions a été utilisée (fig. 4.4). Elle est composée de 61 microphones, disposés en cercles concentriques de rayons croissants avec un facteur 2 (de 8 cm pour le plus petit cercle à 1,28 m pour le plus grand). L'écartement maximal entre

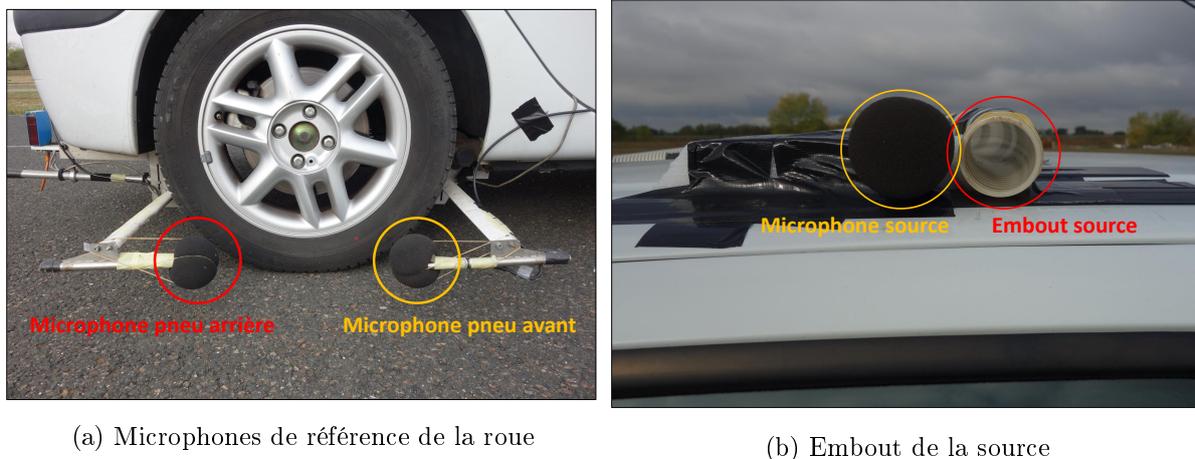


FIGURE 4.2 – Vues rapprochées des microphones de référence de la roue (a) et de la source sonore embarquée (b).

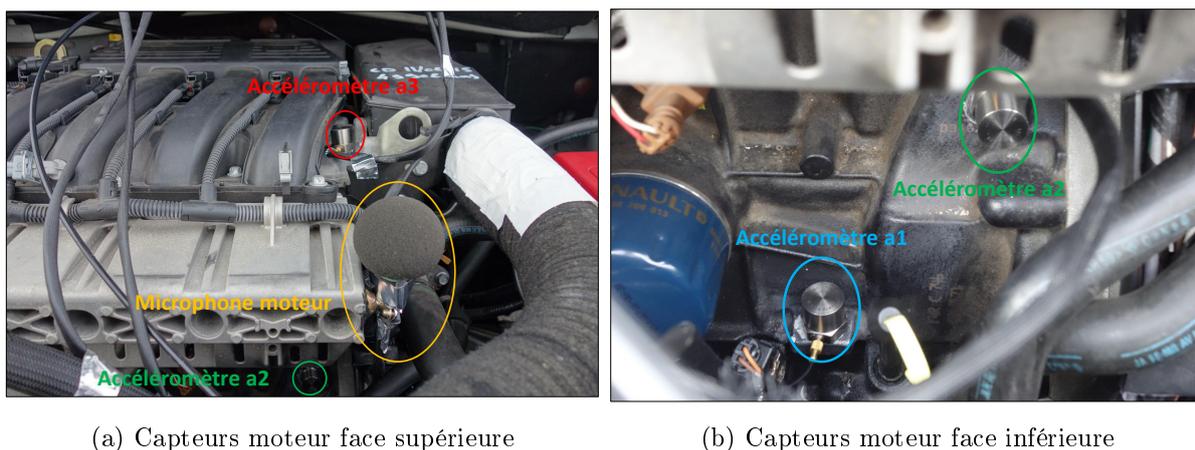


FIGURE 4.3 – Vues sur les capteurs moteur.

deux microphones est donc de 2,56 m et l'écartement minimal est de 4 cm pour les capteurs situés sur le premier cercle. Cela permet d'étudier une plage de fréquence allant jusqu'à 4 kHz sans craindre de pliement spatial.

A proximité de l'antenne, une cellule photoélectrique et un télémètre sont disposés pour donner respectivement la vitesse du véhicule et la distance à laquelle celui-ci passe devant l'antenne (fig. 4.4). La vitesse donnée par la cellule est calculée par l'écart temporel entre la réflexion du rayon lumineux sur la première et sur la deuxième plaque réfléchissante. Avec ce système, on ne peut évaluer que la vitesse moyenne du véhicule lorsqu'il passe devant la cellule : les passages se font à vitesse constante dans ce cas de figure. Le télémètre permet quant à lui d'obtenir la distance à laquelle se trouve le véhicule lorsqu'il passe devant l'appareil. Celui-ci est réglé en hauteur de sorte qu'il détecte le passage des roues au niveau du flanc entre la chaussée et la jante, ce qui permet d'obtenir une valeur de distance pour chaque essieu du véhicule. On prend alors la

TABLE 4.1 – Matériel de mesure embarqué.

Matériel	Fabricant	Modèle	Quantité
Accéléromètre	PCB	352C33	3
Microphone (moteur)	B&K	4135	1
Microphone (roue)	B&K	4188	2
Microphone (source)	B&K	4135	1
Source sonore	B&K	4295	1
Amplificateur (source)	B&K	2716	1
Châssis acquisition (PULSE)	B&K	3660-D-100	1
Module d'acquisition	B&K	3050-A-6/0	2
Module générateur	B&K	3160	1
Amplificateur de charge (accéléros)	B&K	2635	3

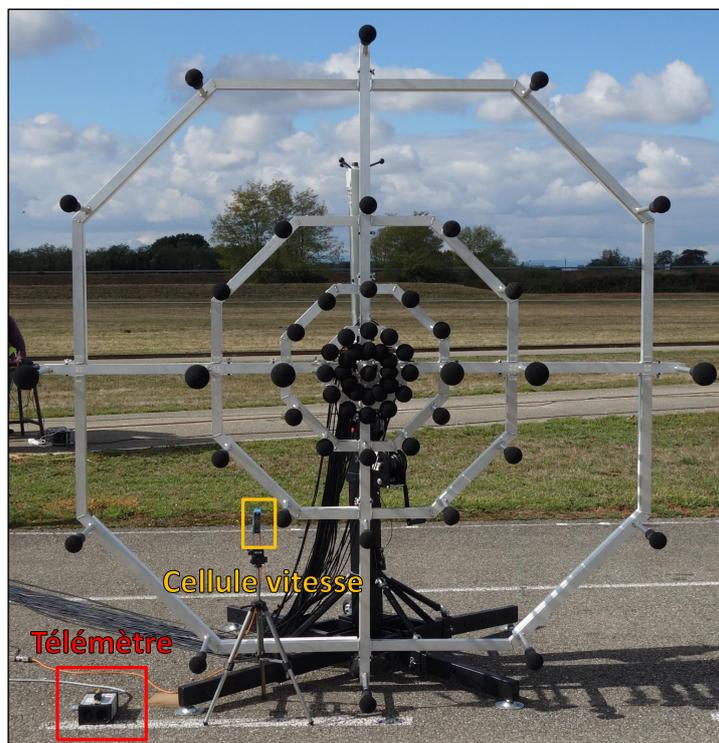


FIGURE 4.4 – Équipement bord de piste (Antenne, télémètre et cellule photoélectrique).

valeur moyenne entre ces deux valeurs pour obtenir un paramètre distance plus précis, essentiel dans la focalisation de l'antenne comme cela a été démontré dans les chapitres précédents.

L'ensemble des équipements de mesure en bord de piste est listé dans le tableau 4.2. Les mesures embarquées et en bord de piste sont réalisées à l'aide d'un système d'acquisition de 128 voies, composé de deux châssis que l'on peut synchroniser par GPS, et la fréquence d'échantillonnage utilisée pour ces mesures est de 32,768 kHz. Ce système est un équipement mutualisé

du Labex CeLyA.

TABLE 4.2 – Matériel de mesure en bord de piste.

Matériel	Fabricant	Modèle	Quantité
Microphone (Antenne)	B&K	4188	61
Télémètre laser	RIEGL	LD90-3100HS	1
Cellule photoélectrique	SICK	WL24-2B430	1
Châssis acquisition (PULSE)	B&K	3660-D-100	1
Module d'acquisition	B&K	3050-A-6/0	11



FIGURE 4.5 – Système de fixation de la source et tuyau de déport.

4.1.2 Source sonore contrôlée

La source sonore utilisée est produite par Brüel & Kjær, et sa plage de fréquence utile convient aux applications de bruits de véhicules routiers. D'après les spécifications techniques fournies par le fabricant, la source permet ainsi d'émettre un signal sur une plage utile de 50 Hz à 6,3 kHz, avec une directivité théoriquement omnidirectionnelle. Ces caractéristiques sont bien adaptées à notre étude, d'où le choix de cet appareil. Néanmoins, quelques difficultés pratiques sont apparues pour son utilisation embarquée dans le véhicule.

En effet, l'orifice de la source devait déboucher sur le côté faisant face à l'antenne lors d'un passage, tout en étant suffisamment éloigné des sources propres du véhicule pour constituer une cible plus aisément identifiable pour la validation des méthodes. Il a donc été décidé de placer la source de manière à émettre depuis le toit de la voiture. Cependant, la forme oblongue de la source (fig. 4.5) rend sa fixation difficile. Nous avons par conséquent choisi de déporter la sortie de l'appareil à l'aide d'un tuyau flexible. La source étant fixée à l'arrière du véhicule à l'aide d'un système de ventouses ainsi que d'une barre liée à l'attache-remorque (fig. 4.5), un flexible a été relié à sa sortie et amené sur le toit de manière à faire affleurer l'extrémité du tuyau avec le bord latéral du toit.

Le tuyau n'est pas neutre dans la restitution des signaux émis par la source. Ceux-ci sont directement générés via le logiciel du système d'acquisition acoustique PULSE, amplifiés avant d'être transmis à la source, puis propagés dans le flexible qui agit comme un guide d'onde. La propagation des ondes s'effectue selon les modes propres du tuyau, dont une extrémité est ouverte. Le signal en sortie du flexible est donc atténué par rapport à sa sortie de la source¹ et modifié par rapport au signal d'origine, c'est pourquoi un microphone de référence a été placé directement à la sortie du tuyau (fig. 4.2b), en supplément de l'enregistrement du signal généré lui-même. La figure 4.6 montre l'effet de la chaîne de transmission (amplificateur, source et tuyau) sur le signal émis par le générateur dans le cas d'une sinusoïde de fréquence 2 kHz (fig. 4.6a) et d'un bruit blanc (fig. 4.6b). Dans le cas de la source tonale, on constate l'apparition en sortie de tuyau d'harmoniques (signe de la présence d'effets non linéaires), visibles dans les mesures bien qu'à des niveaux nettement inférieurs (écart d'environ 25 dB entre la fondamentale et sa première harmonique pour la source tonale). De plus, la densité spectrale de puissance du bruit large bande n'est plus constante sur toute la gamme de fréquence, il ne s'agit donc plus d'un bruit blanc en sortie de tuyau.

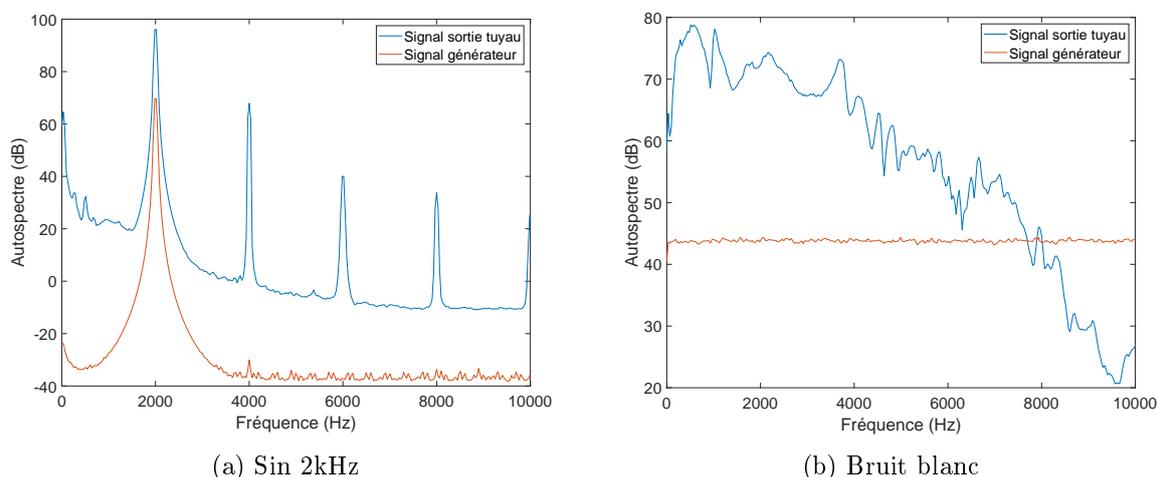


FIGURE 4.6 – Comparaisons des autospectres du signal envoyé par le générateur à la source via l'amplificateur et du signal obtenu en sortie de tuyau.

1. L'onde est atténuée car une partie de l'énergie est réfléchiée à l'extrémité ouverte, et une partie est également dissipée au cours de la propagation en raison des couches limites du tuyau. Cette atténuation est différente selon la fréquence de l'onde notamment.

4.2 Paramètres des méthodes

Dans tout ce qui suit, et sauf indication contraire, le traitement est réalisé en statique sur une durée de 250 ms, ce qui correspond dans le cas de MSA-PSF à 23 snapshots de 25 ms et un recouvrement des snapshots (ou overlap) de 60%. Dans le cas mobile, le véhicule est suivi sur un intervalle spatial allant de -2 m à +2 m, l'abscisse 0 m correspondant à l'abscisse du centre de l'antenne. Cette longueur de suivi étant fixe, la durée de suivi varie en fonction de la vitesse. Cela se traduit dans le cas de MSA-PSF, pour un nombre de snapshots constants, par une durée de snapshot variable : de cette manière, la longueur de suivi reste constante et la condition $vT^{(e)} \ll D$ (cf. Chapitre 1) est vérifiée². Pour les passages respectivement à 30 km.h⁻¹, 50 km.h⁻¹ et 70 km.h⁻¹, 37 snapshots respectivement de 31 ms, 19 ms et 13 ms sont utilisés.

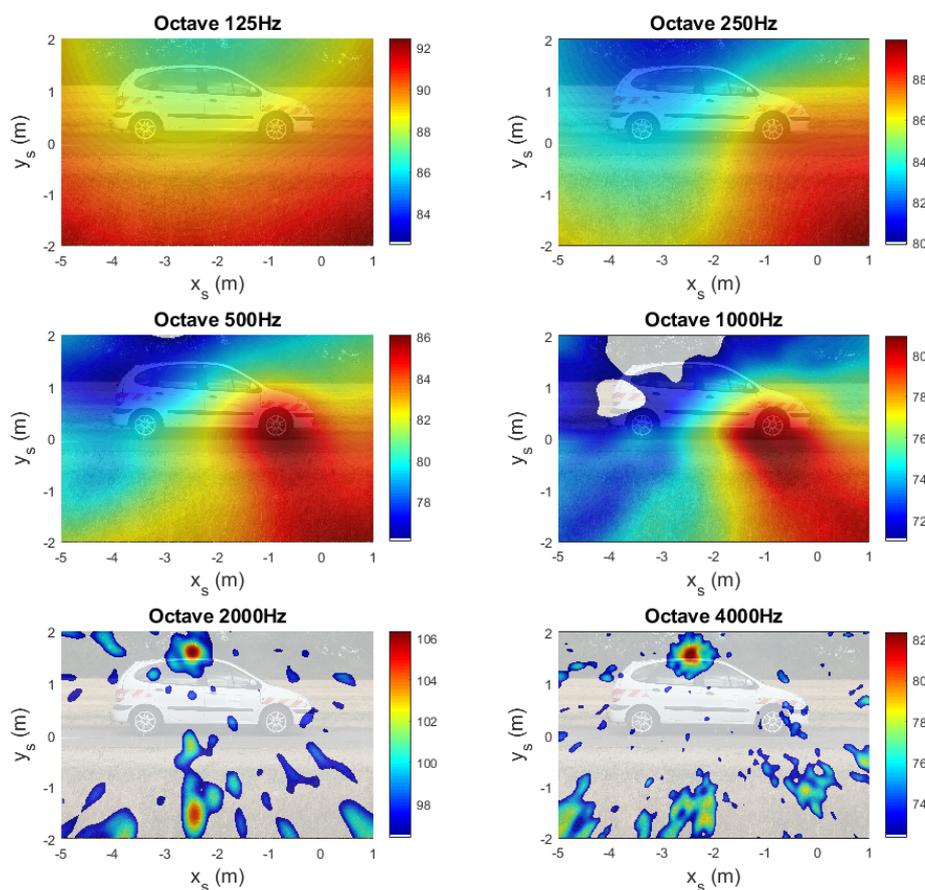


FIGURE 4.7 – Formation de voies du véhicule à l'arrêt, moteur au ralenti, la source étant sur le toit. Étendue totale de la grille-source. Échelle de couleur : niveau des sources (dB), dynamique : 10 dB.

Pour l'algorithme CLEAN, un facteur de boucle égal à 1 a été choisi, de manière à limiter le temps de calcul : comme il sera discuté par la suite, on peut envisager d'améliorer les résultats en jouant sur ce facteur, ce qui ne sera pas présenté dans ce document mais suggéré pour de

2. On fixe un rapport 10 entre les deux membres de l'inégalité.

futurs développements. Deux critères d'arrêts ont été choisis : un critère énergétique et un critère de convergence (tel que décrits dans les chapitres 2 et 3). Un nombre maximal d'itérations de 10 a également été fixé. Dans tout ce qui suit, une fonction de localisation différente des chapitres 2 et 3 a été utilisée ici, car elle permet d'améliorer le résultat de la méthode à basse fréquence : la fonction correspondant au maximum de vraisemblance [Faure 2011] a été choisie au lieu de la sortie de FV. Ce choix n'est cependant pas nécessairement optimal à toutes les fréquences, et des résultats obtenus en utilisant plutôt la sortie de FV seront présentés en Annexe A. De plus, une illustration de l'évolution de la cartographie résiduelle à chaque itération sera présentée en Annexe B et permettra d'illustrer certains effets relatifs à ce choix.

La grille-source utilisée dans le traitement couvre une zone plus large que le véhicule, ceci afin de distinguer les sources réellement identifiées d'éventuels effets numériques en bord de grille. La zone prend une marge de 1 m à l'avant et à l'arrière, ainsi que de 50 cm en hauteur et 2 m vers le bas, de manière à identifier d'éventuelles réflexions au sol. Une cartographie de formation de voies est donnée en exemple (fig. 4.7) pour illustrer l'étendue totale de la grille-source pour le traitement. Cependant, les sources d'intérêt étant situées dans la zone correspondant au véhicule, par la suite le tracé des cartographies couvrira donc une zone plus restreinte (bien que le traitement soit toujours réalisé sur une grille plus large). La grille-source est un rectangle de 6 m sur 4 m, avec un pas de grille de 10 cm. Un pas plus fin peut être utilisé pour plus de précision, mais augmente considérablement le temps de calcul. Cela sera fait dans une configuration particulière et dans une zone limitée.

Les grandeurs présentées dans les cartographies représentent les niveaux de pression des sources identifiées à 1 m, pour six bandes d'octave différentes, centrées sur les fréquences 125, 250, 500, 1000, 2000 et 4000 Hz. La formation de voies et CLEANT (sauf indication contraire) réalisent un traitement large bande, opérant dans le domaine temporel, tandis que MSA-PSF réalise un traitement fréquence par fréquence en bande fine (résolution fréquentielle de 32 Hz). Les densités spectrales des sources sont calculées en sortie de la FV et de CLEANT pour des fréquences discrétisées, tandis qu'elles sont directement obtenues en sortie de MSA-PSF. Une somme énergétique est alors réalisée pour obtenir le niveau d'une bande d'octave : les cartographies obtenues correspondent donc à un affichage par bande d'octave, et non à un traitement par bande avec un filtrage fréquentiel.

4.3 Mesure statique

De manière analogue au cas expérimental du pendule, examinons dans un premier temps la performance des méthodes sur un cas statique simple. Le véhicule étant à l'arrêt, les seules sources de bruit sont la source B&K ainsi que le GMP, le moteur étant en marche.

4.3.1 Configurations de mesure

Deux situations ont été testées en statique : une première où la source est située sur le toit, donc éloignée des sources propres du véhicule, en l'occurrence principalement du bruit du moteur (puisque le véhicule est à l'arrêt) ; une deuxième où celle-ci est à proximité directe du bruit émis par le GMP, placée contre la roue et sans flexible (fig. 4.8), dans la zone proche d'une source de bruit de contact pneu-chaussée du véhicule en roulement. Cette dernière position permettra



FIGURE 4.8 – Position de la source dans la deuxième configuration statique.

de tester dans une zone restreinte des approches de séparation faisant intervenir une référence, telles que présentées au premier chapitre dans la section 1.3, et sera étudiée plus tard dans ce chapitre dans la section 4.5.

Les configurations en statique font varier le régime moteur qui prend deux valeurs possibles selon la mesure : 1000 tr.min^{-1} (régime ralenti) et 2000 tr.min^{-1} . La source, lorsqu'elle est active, émet soit un sinus de fréquence 1 kHz ou 2 kHz, soit un bruit large bande, et est inactive dans certaines configurations. À noter que le bruit large bande est à l'origine un bruit blanc, modifié par la propagation dans le tuyau³, comme mentionné dans la section 4.1.2. L'ensemble des configurations statiques étudiées sont listées dans le tableau 4.3.

TABLE 4.3 – Configurations de mesure du véhicule en statique.

Num. config.	Régime moteur (tr.min^{-1})	Signal source
Source localisée sur le toit		
1		sin 1 kHz
2	Ralenti (1000)	sin 2 kHz
3		Bruit blanc
Source localisée contre la roue		
4	Ralenti (1000)	Sans signal
5	2000	
6	Ralenti (1000)	sin 1 kHz
7	2000	
8	Ralenti (1000)	sin 2 kHz
9	2000	
10	Ralenti (1000)	Bruit large bande
11	2000	

3. Sauf dans le cas où la source B&K est située contre la roue, où le flexible n'est pas utilisé.

L'ensemble des cartographies correspondant à toutes les configurations testées lors des mesures ne sera pas présenté ici, par souci de concision. Certaines configurations n'apportent en effet pas d'information supplémentaire dans l'évaluation des méthodes, bien qu'elles puissent être exploitées par la suite dans l'optique d'obtenir de l'information sur les sources du véhicule : une seule configuration sera donc étudiée ici. Dans cette section, la configuration analysée concerne le cas où le signal délivré par la source est une sinusoïde de fréquence 2 kHz (configuration 2 du tableau 4.3).

4.3.2 Résultats de mesure

Dans la configuration présentée ici, la sortie de la source B&K est située sur le toit (déportée par le flexible). Cette position permet de valider la mesure et l'application des méthodes dans un cas relativement simple, puisque seules deux sources principales d'intérêt sont présentes (la source B&K et le GMP), et que le véhicule est statique. De plus, ces sources sont éloignées l'une de l'autre, ce qui devrait rendre leur identification aisée.

Formation de voies

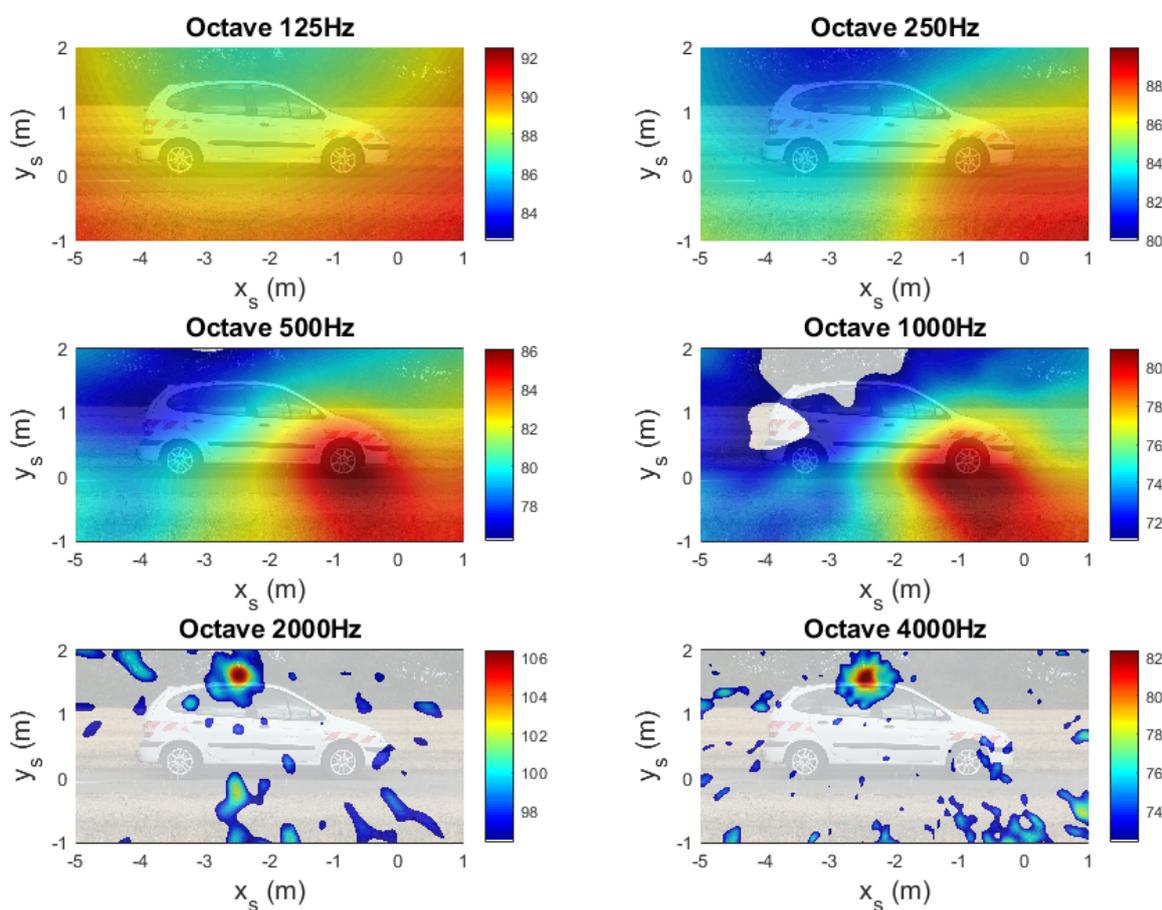


FIGURE 4.9 – Formation de voies du véhicule à l'arrêt, moteur au ralenti, la source étant sur le toit. Échelle de couleur : niveau des sources (dB), dynamique : 10 dB.

Examinons tout d'abord le résultat obtenu par la formation de voies (fig. 4.9). On note bien l'amélioration de la résolution spatiale de la méthode à mesure que la fréquence augmente, la cartographie obtenue pour la bande d'octave 125 Hz étant inexploitable en l'état à cause de la trop grande étendue de la réponse d'antenne (cf. Annexe D), et l'image se précisant pour les bandes suivantes. En effet, on voit émerger deux sources : tout d'abord, au niveau de la roue avant, source qui apparaît dès la bande centrée sur 250 Hz mais sur une large zone,

celle-ci se réduisant dans les bandes 500 Hz puis 1 kHz. La source B&K apparaît clairement dans la bande centrée sur 2 kHz, ce qui est conforme aux attentes puisque le signal délivré dans cette configuration est une sinusoïde de 2 kHz. De plus, on observe que la source est également prépondérante dans la bande centrée sur 4 kHz, à un niveau cependant plus faible : cela correspond à la première harmonique apparaissant dans le spectre du signal de la source en sortie de tuyau, tel qu'illustré précédemment dans la figure 4.6a.

MSA-PSF

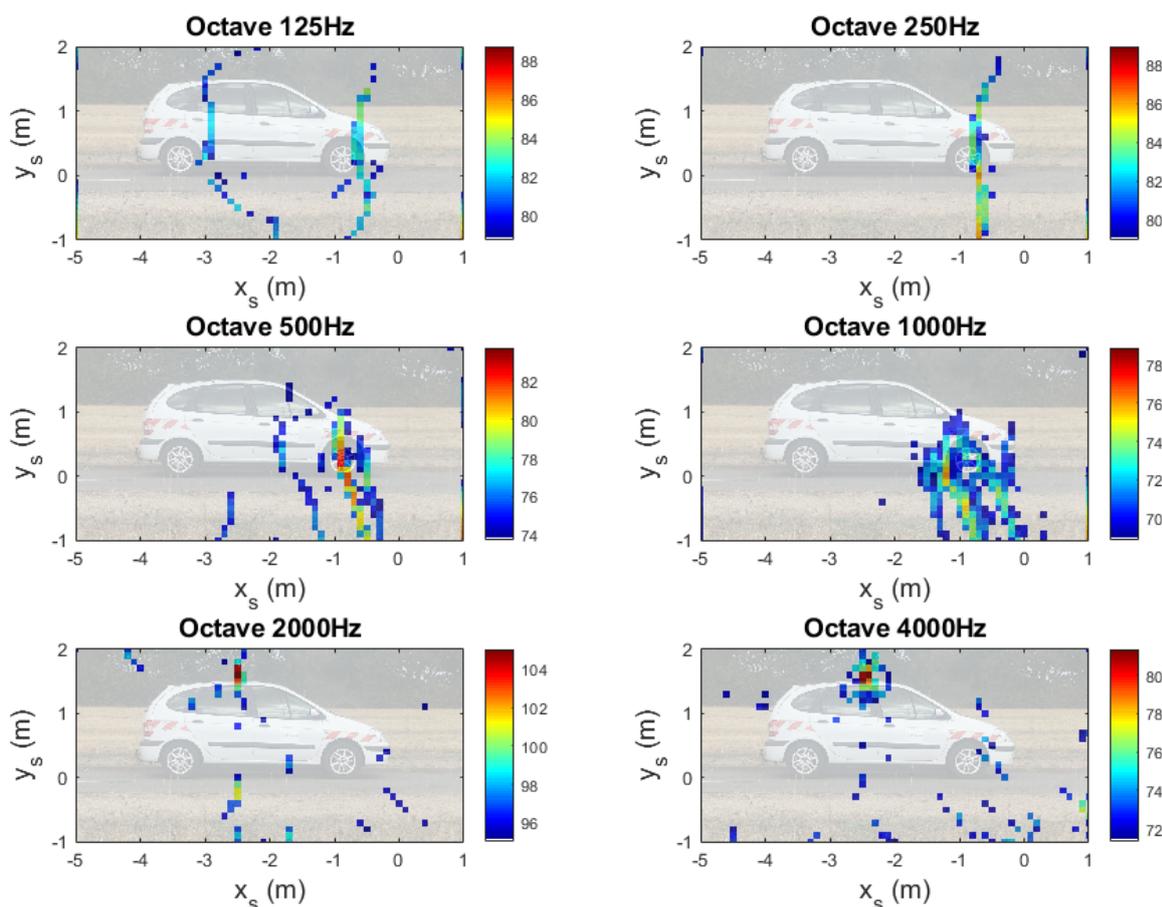


FIGURE 4.10 – Cartographie obtenue par MSA-PSF du véhicule à l'arrêt, moteur au ralenti, la source étant sur le toit. Échelle de couleurs : niveau des sources (dB), dynamique : 10 dB.

La deuxième série de cartographies est obtenue par MSA-PSF (fig. 4.10). En configuration statique, la méthode est équivalente à une déconvolution classique, puisqu'il s'agit du cas limite où la vitesse est nulle. La première bande d'octave ne fournit pas d'information fiable, MSA-PSF étant dépendante de la résolution fréquentielle de la FV et ne pouvant identifier de source compte tenu de l'aspect de la cartographie de FV dans cette bande (cf. paragraphe précédent). En revanche, la méthode localise des sources proches du passage de roue avant dans les bandes suivantes (250 Hz à 1 kHz) : on retrouve ainsi la présence du bruit de moteur. La source B&K

apparaît clairement dans la bande d'octave centrée sur 2 kHz, ainsi que celle centrée sur son harmonique à 4 kHz. Comme attendu d'une déconvolution, ces contributions de sources sont localisées sur des zones plus réduites que la FV. On note cependant un assez grand nombre de contributions secondaires, notamment dans la bande centrée sur 1 kHz.

Bien que les zones de bruit attendues soient identifiables sur ces cartographies (passages de roue et toit), on peut s'étonner de ne pas obtenir un résultat plus précis, avec moins de sources secondaires de niveaux significatifs (la dynamique des cartographies est de 10 dB). Cela traduit une mauvaise représentativité de la PSF par rapport à la réalité, le modèle de propagation ne rendant pas correctement compte de la propagation réelle des sources.

CLEANT

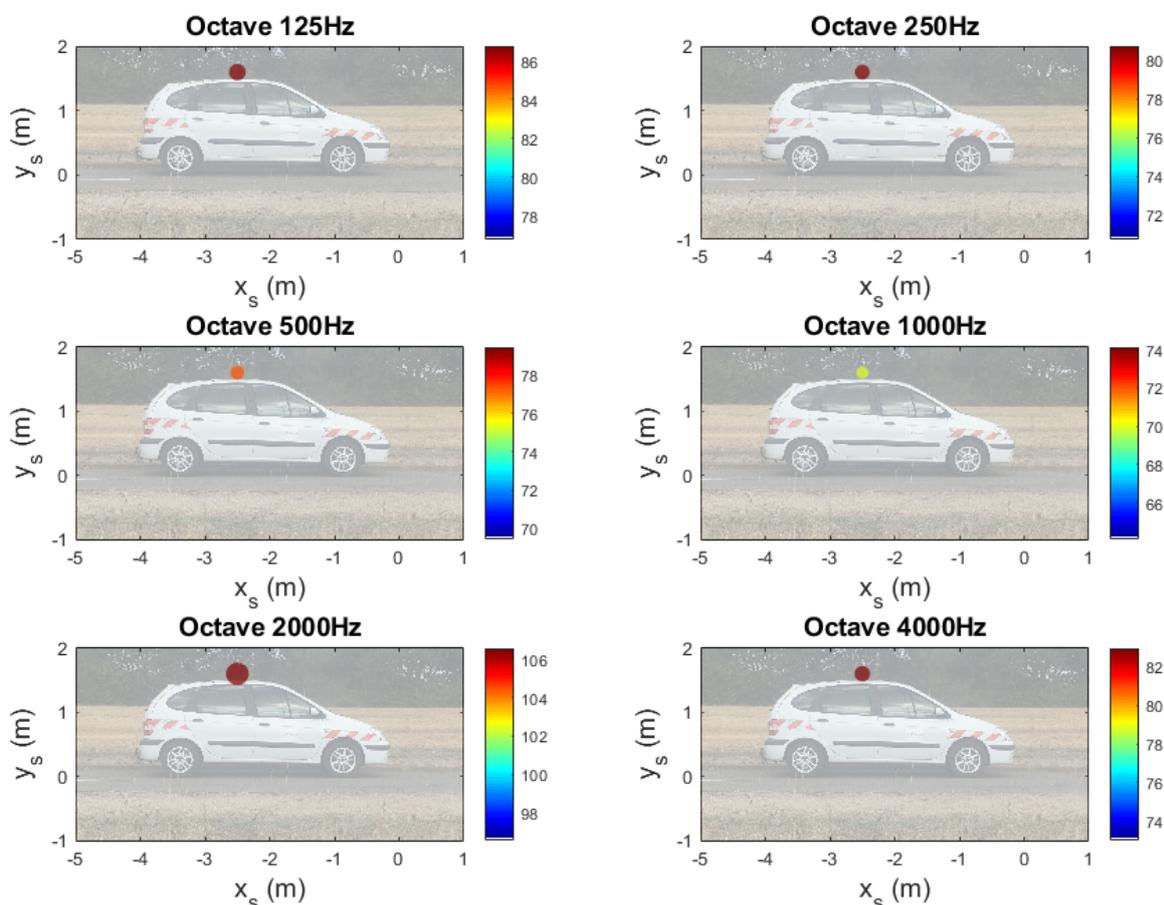


FIGURE 4.11 – Cartographie obtenue par CLEANT (large bande) du véhicule à l'arrêt, moteur au ralenti, la source étant sur le toit. Échelle de couleurs : niveau des sources (dB), dynamique : 10 dB.

Le mode de représentation des résultats de CLEANT est différent des deux autres méthodes (fig. 4.11). En effet, du fait de sa forte parcimonie, les sources identifiées sont localisées sur des points uniques, n'apparaissant que sur un pixel de l'image (point de la grille-source). Les

représenter par une cartographie classique ne permet pas une visualisation correcte à l'échelle du véhicule. La représentation qui a été choisie est donc sous forme de disques dont à la fois la couleur et le rayon dépendent du niveau de la source : celui-ci agit sur la couleur des sources selon l'échelle de couleurs, ainsi que sur la surface du disque qui lui est proportionnelle. De plus, toutes les sources de niveau inférieur au minimum de l'échelle de couleurs sont représentées en blanc ; dans ce cas, seule la surface du disque informe sur le niveau.

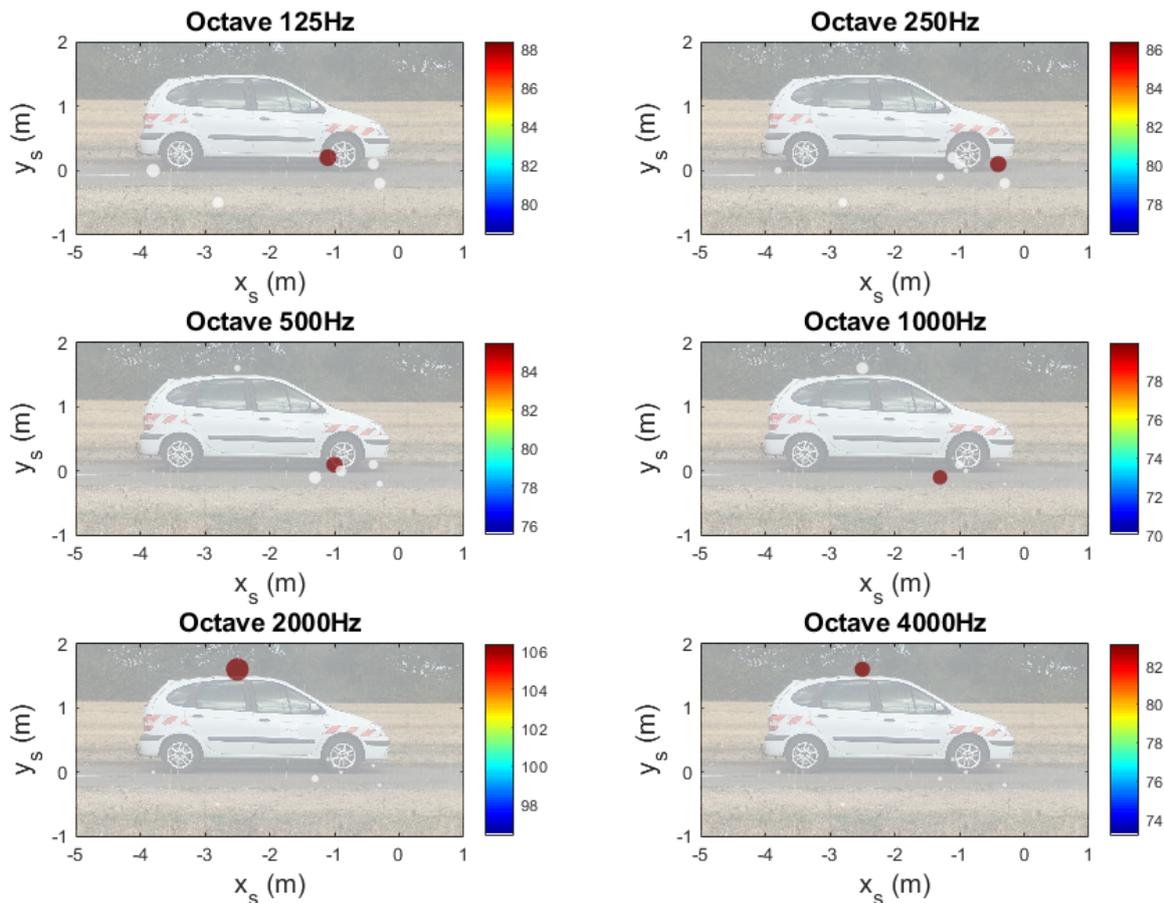


FIGURE 4.12 – Cartographie obtenue par CLEANT (filtrage par octaves) du véhicule à l'arrêt, moteur au ralenti, la source étant sur le toit. Échelle de couleurs : niveau des sources (dB), dynamique : 10 dB.

La figure 4.11 présente les cartographies obtenues en utilisant CLEANT dans sa version large bande. On constate que seule la source B&K sur le toit du véhicule est identifiée. Par rapport aux deux autres méthodes, on ne distingue pas le bruit provenant du moteur et localisé vers le passage de roue avant. La raison est semblable aux constats établis dans le deuxième chapitre concernant la localisation par CLEANT : la source B&K émet à un niveau bien plus élevé que le bruit de moteur au ralenti (de l'ordre de 20 dB de plus), et par conséquent, représente une part très importante de l'énergie totale de la cartographie. Une fois cette source identifiée et retirée, il ne reste pas assez d'énergie en haute fréquence pour localiser correctement le bruit provenant du moteur. Une double mesure devrait être prise pour corriger ce défaut : adapter à la fois le

facteur de boucle ainsi que le critère d'arrêt de l'algorithme, de manière à détecter des sources de niveaux plus faibles dans la bande de fréquence occupée par la source B&K.

Il s'agit d'un cas typique où la version filtrée en fréquence de CLEAN, présentée dans le deuxième chapitre, est utile : en filtrant selon les bandes d'octave affichées, on isole le traitement du pic de la source à 2 kHz dans la bande centrée sur cette fréquence, ainsi que celui de sa première harmonique à 4 kHz. On retrouve ainsi le bruit de moteur émis dans la zone du passage de roue dans les bandes d'octave inférieures (fig. 4.12), ainsi que dans les octaves 2 et 4 kHz, à des niveaux faibles par rapport à la source B&K. Rappelons qu'en sortie de l'algorithme avec filtrage fréquentiel, l'ensemble des contributions dans toutes les bandes de fréquences sont sommées pour obtenir des signaux temporels de source, deux sources localisées aux mêmes coordonnées dans deux bandes différentes ne représentant donc qu'une seule source dans la cartographie source.

On remarque l'apparition de sources secondaires dans chaque bande d'octave. Une partie de l'énergie de certaines sources peut se trouver dans des bandes adjacentes, à des niveaux nettement inférieurs (points-sources blancs dans les cartographies). De plus, comme mentionné plus haut, certaines sources peuvent être localisées à des positions identiques dans deux bandes de fréquences différentes.

4.3.3 Bilan de la mesure statique

Dans cette configuration, la source B&K positionnée sur le toit est correctement identifiée par toutes les méthodes, et l'on trouve des zones de bruit proches de la roue avant rendant très probablement compte du bruit de moteur. La cartographie de FV illustre le problème de mauvaise résolution à basse fréquence, qui donne une image diffuse des sources et ne permet pas une localisation précise. Cette localisation s'affine à mesure que la fréquence augmente. La déconvolution de MSA-PSF permet d'affiner marginalement cette localisation en introduisant de la parcimonie, mais ne peut cependant pas identifier de source dans la bande d'octave la plus basse, à cause de la mauvaise résolution en FV et des écarts du modèle par rapport à la réalité. De plus, les résultats de déconvolution sont relativement décevants, avec la présence de nombreuses sources secondaires de niveau non négligeable, que l'on peut imputer à la relative inadaptation de la PSF à la mesure.

Enfin, ce cas particulier de mesure est un bon exemple d'une situation dans laquelle le filtrage fréquentiel est intéressant dans CLEAN. En effet, dans sa version non filtrée, la méthode identifie uniquement la source B&K sur le toit et échoue à repérer le bruit de moteur. Cela s'explique par le trop grand écart de niveau entre la source B&K et ce dernier : l'ajustement du facteur de boucle et des critères d'arrêt peut permettre de repérer les autres sources malgré cette différence de niveau. Une autre solution consiste à utiliser la version filtrée de CLEAN, permettant d'isoler la fréquence émise par la source B&K ainsi que sa première harmonique, ce qui améliore nettement le résultat : la méthode identifie alors correctement les deux sources principales (source B&K et GMP), et localise également le bruit de moteur dans la bande d'octave centrée sur 125 Hz, malgré la mauvaise résolution de la FV.

Nous avons fait le constat que la version filtrée en fréquence de CLEAN était nécessaire grâce à la comparaison avec la cartographie de formation de voies. Malgré des résultats très intéressants, dans son état actuel de développement CLEAN nécessite donc de s'appuyer sur un résultat de formation de voies classique pour son interprétation.

4.4 Mesure au passage d'un véhicule

Examinons à présent la situation expérimentale plus complexe du véhicule en mouvement à vitesse stabilisée. Aux bruits émis par la source B&K et par le GMP, déjà présents dans le cas statique, s'ajoute le bruit de roulement. L'équilibre entre les niveaux de ces sources varie selon la vitesse du véhicule.

TABLE 4.4 – Configurations de passages du véhicule.

Num. config.	Vitesse (km.h ⁻¹)	Rapport de boîte	Signal source
1	30	2 ^{de}	
2	50	3 ^{ème}	Sans signal
3	70	4 ^{ème}	
4	30	2 ^{de}	
5	50	3 ^{ème}	sin 1 kHz
6	70	4 ^{ème}	
7	30	2 ^{de}	
8	50	3 ^{ème}	sin 2 kHz
9	70	4 ^{ème}	
10	30	2 ^{de}	
11	50	3 ^{ème}	Bruit blanc
12	70	4 ^{ème}	

4.4.1 Configurations de passage

Plusieurs configurations de passage ont été testées, combinaisons de deux paramètres principaux : la vitesse du véhicule et le signal émis par la source. En effet, trois vitesses de passage ont été étudiées : 30, 50 et 70 km.h⁻¹. Comme pour le cas statique, la source peut émettre soit un sinus de fréquence 1 kHz ou 2 kHz, soit un bruit large bande, soit être inactive. L'ensemble des configurations dynamiques étudiées sont listées dans le tableau 4.4.

De même que dans le cas statique, toutes les configurations ne seront pas présentées ici. Une seule configuration de bruit au passage avec source B&K, et une autre sans cette source seront étudiées.

4.4.2 Résultats de mesure avec la source contrôlée

La configuration choisie pour illustrer les performances des méthodes sur un véhicule au passage avec la source B&K en marche est la configuration 8 du tableau 4.4. Il s'agit de la vitesse intermédiaire de 50 km.h⁻¹, la source émettant le même signal que dans le cas statique étudié plus haut (correspondant à un sinus de 2 kHz émis par le générateur).

Formation de voies avec suivi de source

La cartographie produite par la formation de voies avec suivi de source présente les zones sources attendues (fig. 4.13). Les deux premières bandes d'octave sont peu exploitables, du fait

de la mauvaise résolution de la méthode à basse fréquence, mais la bande centrée sur 250 Hz permet tout de même de repérer une tendance vers une localisation du bruit proche des roues. La bande centrée autour de 500 Hz montre un niveau clairement supérieur dans la zone de la roue avant par rapport à la roue arrière : on peut supposer que le bruit du moteur s'ajoute au bruit de roulement pour causer une telle différence. La source émerge dans la bande centrée sur 2 kHz, comme attendu, et le niveau de son harmonique à 4 kHz est comparable au niveau du bruit de roulement que l'on retrouve dans la dernière bande d'octave. La différence de niveau entre la fondamentale et la première harmonique est ici d'environ 25 dB, ce qui est du même ordre que la différence constatée sur la figure 4.6a.

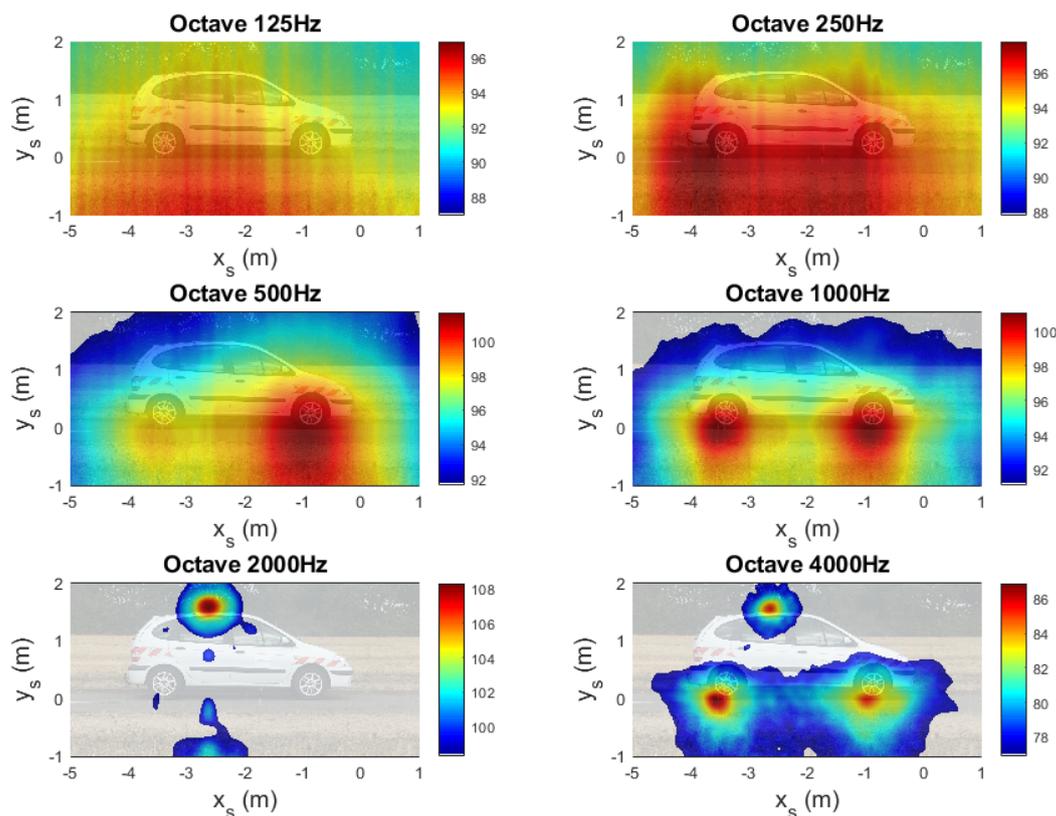


FIGURE 4.13 – Formation de voies avec suivi de source du véhicule au passage. Vitesse $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, signal source $\sin 2 \text{ kHz}$. Échelle de couleur : niveau des sources (dB), dynamique : 10 dB.

MSA-PSF

Il est intéressant dans un premier temps de comparer la cartographie de formation de voies obtenue par MSA-PSF (fig. 4.14) avec celle obtenue par la méthode temporelle avec suivi de source (fig. 4.13). Pour rappel, MSA-PSF fait l'hypothèse de quasi-stationnarité des sources au sein d'une courte fenêtre temporelle, de manière à réaliser la formation de voies dans le domaine fréquentiel, à une fréquence dopplérisée. Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, les hypothèses formulées dans cette méthode sont plus difficilement vérifiées dans le cas d'un véhicule routier que dans le cas d'un avion par exemple, en particulier du fait de la proximité

entre les sources et l'antenne ce qui se traduit en des taches "étirées" dans le sens du mouvement.

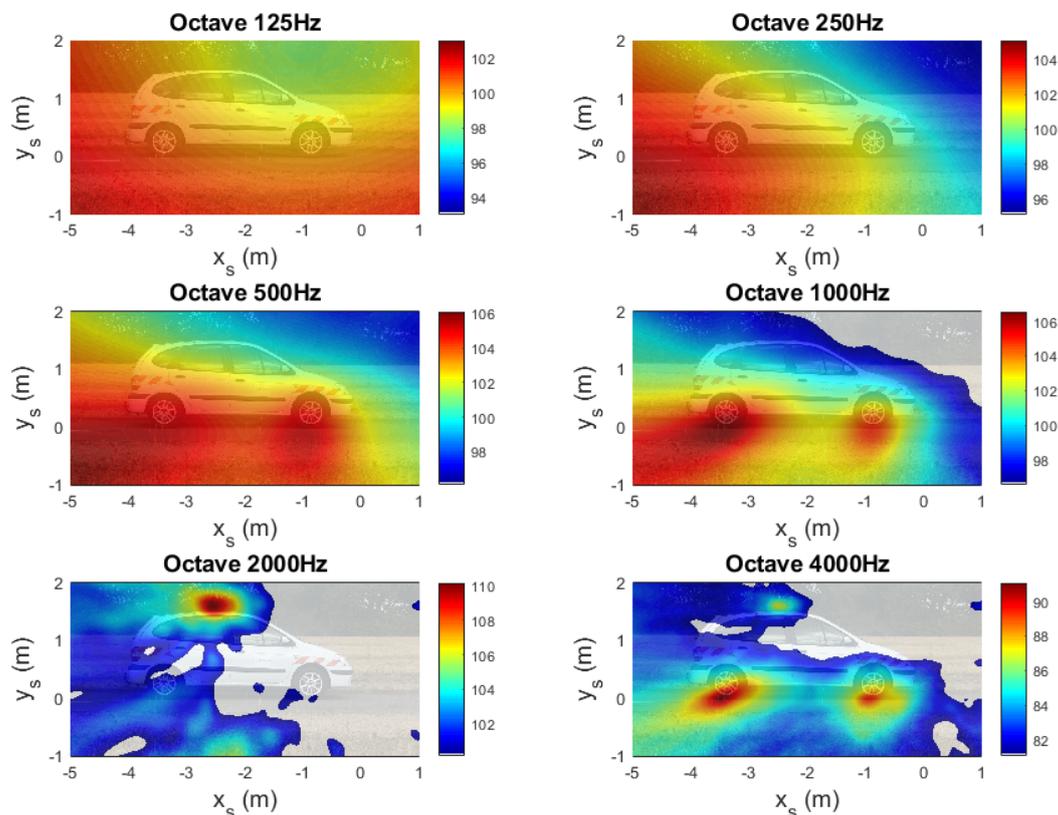


FIGURE 4.14 – Cartographie du véhicule au passage obtenue avec MSA-PSF (formation de voies). Vitesse 50 km.h^{-1} , signal source $\sin 2 \text{ kHz}$. Échelle de couleur : niveau des sources (dB), dynamique : 10 dB.

Malgré ces quelques difficultés sur les hypothèses dans ce contexte routier, la méthode parvient tout de même à identifier les principales sources, le bruit de roulement au niveau des roues et la source émergente à 2 kHz (fig. 4.15). Comme dans le cas statique, les premières bandes d'octave ne donnent pas d'information sur les sources qui ne sont véritablement identifiées qu'à partir de la bande centrée sur 500 Hz. Le résultat est, comme en statique, globalement mitigé avec la présence d'un nombre important de sources secondaires, de même que des "sources" au milieu de la grille dans la première bande. La méthode semble être particulièrement sensible aux erreurs de modèle par rapport à la réalité (directivité, réflexions).

On note également une perte de niveau par rapport à la cartographie de FV. Dans les trois dernières bandes de fréquence considérées, la somme énergétique des points-sources voisins d'une source principale permet de retrouver un niveau plus proche de celui obtenu en FV. Néanmoins, ce n'est pas le cas de l'octave 500 Hz où la perte en niveau est plus flagrante.

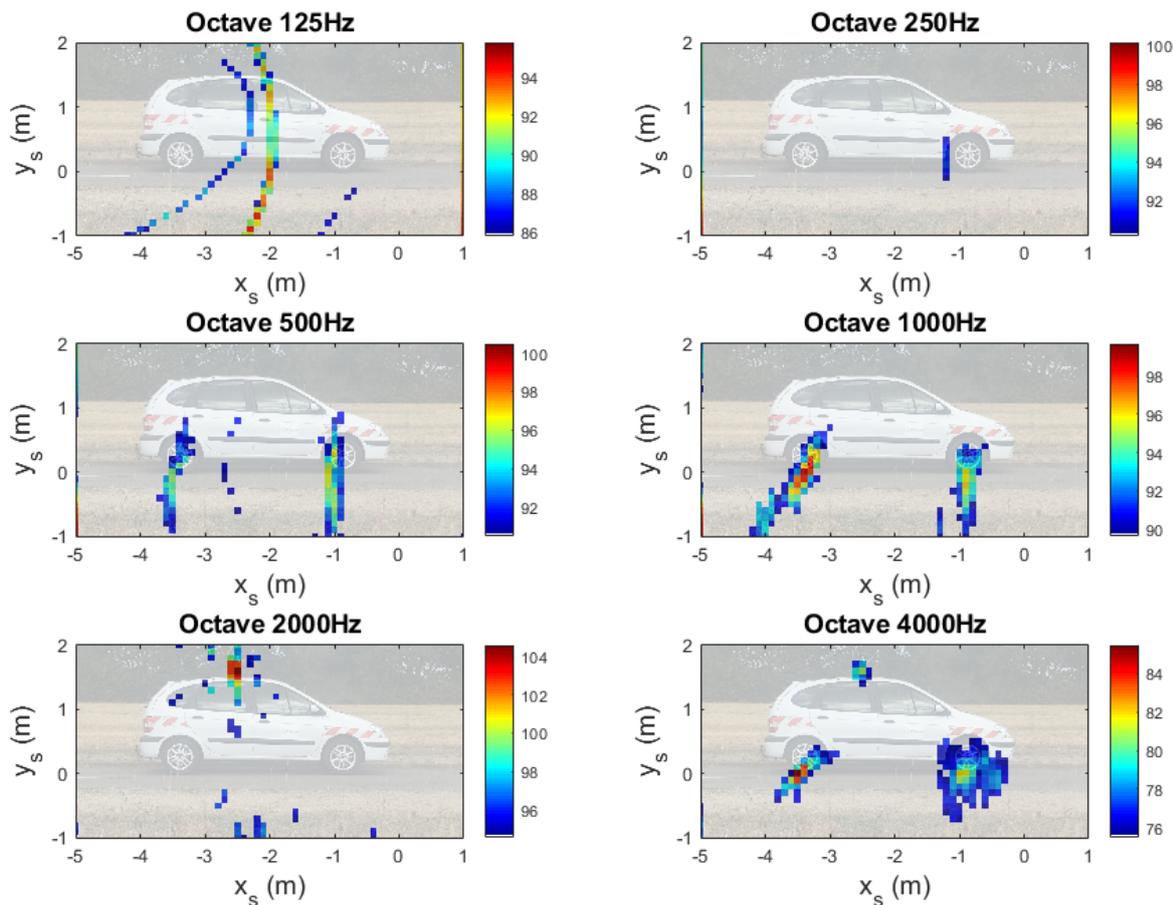


FIGURE 4.15 – Cartographie du véhicule au passage obtenue avec MSA-PSF (déconvolution). Vitesse $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, signal source $\sin 2 \text{ kHz}$. Échelle de couleur : niveau des sources (dB), dynamique : 10 dB.

CLEANT

L'application de CLEANT en configuration statique a montré qu'il était nécessaire d'utiliser sa version filtrée en fréquence. Le filtre correspond toujours aux bandes d'octave, et la méthode permet de repérer les principales sources du véhicule en mouvement (fig. 4.16). De même qu'en statique, on constate aussi la présence de sources secondaires dans chaque bande. On repère néanmoins sans difficultés les zones-sources principales de la source B&K et des deux roues. Les niveaux trouvés sont en général légèrement inférieurs à ceux constatés dans la cartographie de formation de voies, mais restent du même ordre et leur évolution d'une octave à une autre suit la même tendance. On note cependant que la source située au niveau de la roue avant n'est pas identifiée dans l'octave 4000 Hz, ce qui peut être dû au choix des critères d'arrêt.

On peut également regretter l'absence d'un plus grand nombre de sources identifiées dans la zone de la roue avant notamment, pour laquelle on souhaiterait séparer le bruit de roulement du bruit de moteur. Une focalisation sur cette zone précise, avec un pas de grille plus fin, et l'adaptation des critères d'arrêt ainsi que du facteur de boucle pourraient donner des résultats

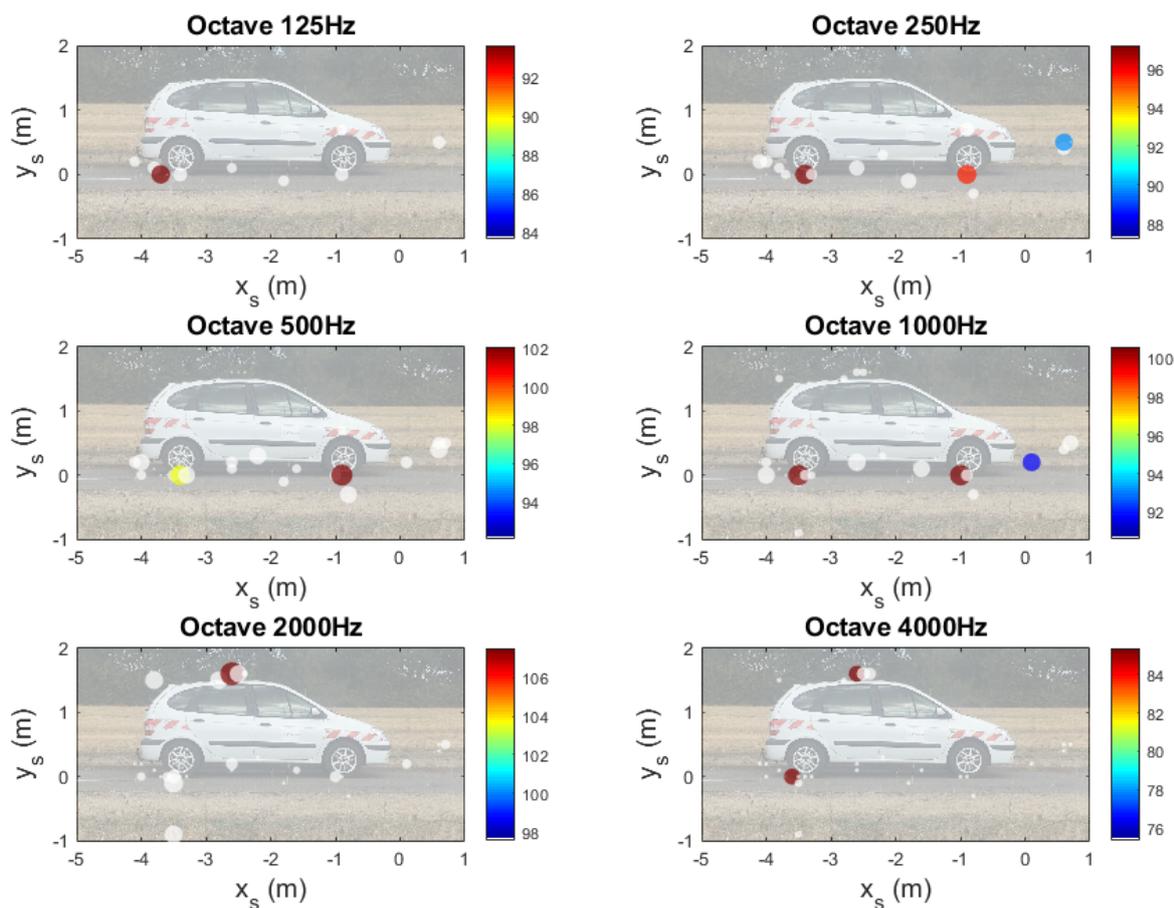


FIGURE 4.16 – Cartographie du véhicule au passage obtenue avec CLEANT (filtrage par octaves). Vitesse 50 km.h^{-1} , signal source $\sin 2 \text{ kHz}$. Échelle de couleur : niveau des sources (dB), dynamique : 10 dB.

plus convaincants, et constitue un axe de recherche futur. De même, l'utilisation du filtrage par cohérence peut éventuellement donner une information sur les contributions des sources physiques à la source identifiée par CLEANT, ce qui sera discuté ultérieurement.

Synthèse des résultats de mesure avec source contrôlée

Cette configuration avec la source B&K active est une étape de validation supplémentaire avant d'arriver au passage du véhicule dans une configuration la plus proche possible de conditions réelles, sans source additionnelle.

La formation de voies donne un résultat dans la lignée du cas statique : les premières bandes d'octave ne sont pas exploitables, du fait de la mauvaise résolution de la méthode en basse fréquence. Néanmoins, les zones sources attendues sont bien localisées par la suite, en particulier la source B&K et les deux passages de roues qui forment, dans cette configuration, les trois zones sources principales. La dédopplérisation est efficace puisque les zones sources ne sont pas déformées par le mouvement, en comparaison avec le cas statique.

Le résultat de MSA-PSF tend à confirmer les difficultés concernant son applicabilité au

cas routier, dans la mesure où les zones sources identifiées sont légèrement étirées dans le sens du mouvement, ce qui est visible dans la cartographie déconvoluée notamment dans les bandes 1000 Hz et 4000 Hz. La déconvolution de la source B&K est néanmoins satisfaisante dans l'octave 2000 Hz, apportant de la précision en localisation par rapport à la formation de voies. Cependant, tout comme dans le cas statique, on constate la présence de nombreuses sources secondaires, probablement dues à l'écart entre le modèle et la mesure (réflexions, directivité), ainsi que des niveaux de sources plus faibles que dans la FV.

Enfin CLEAN-T propose des résultats très encourageants, avec en particulier l'identification de zones sources pertinentes (passages de roues) dans les premières bandes d'octave, là où les deux autres méthodes échouent à fournir une information exploitable. La présence de sources identifiées vers l'avant et en dehors du véhicule semble indiquer une certaine sensibilité à l'écart entre le modèle et la mesure (réflexions, directivités des sources). La cartographie obtenue par CLEAN-T pourrait être améliorée par l'ajustement des critères d'arrêt et du facteur de boucle, ce qui constitue une voie d'amélioration de la méthode.

4.4.3 Résultats de mesure sans la source contrôlée

Dans cette section, nous nous intéressons à un passage sans que la source B&K n'émette de signal. Il s'agit donc d'une condition de passage "classique", telle que ciblée dans les objectifs de la thèse. Le passage étudié est à nouveau à 50 km.h^{-1} , vitesse intermédiaire des trois vitesses testées dans ces mesures.

Formation de voies avec suivi de source

De même que dans la section précédente, la cartographie produite par la formation de voies avec suivi de source est conforme aux attentes (fig. 4.17). Les deux premières bandes d'octave sont peu exploitables, du fait de la mauvaise résolution de la méthode à basse fréquence, si ce n'est pour donner une tendance de localisation du bruit vers l'arrière du véhicule. La bande centrée autour de 500 Hz montre une nouvelle fois un niveau clairement supérieur dans la zone de la roue avant. Le niveau s'équilibre entre les deux roues sur les bandes suivantes et est même légèrement supérieur à l'arrière qu'à l'avant.

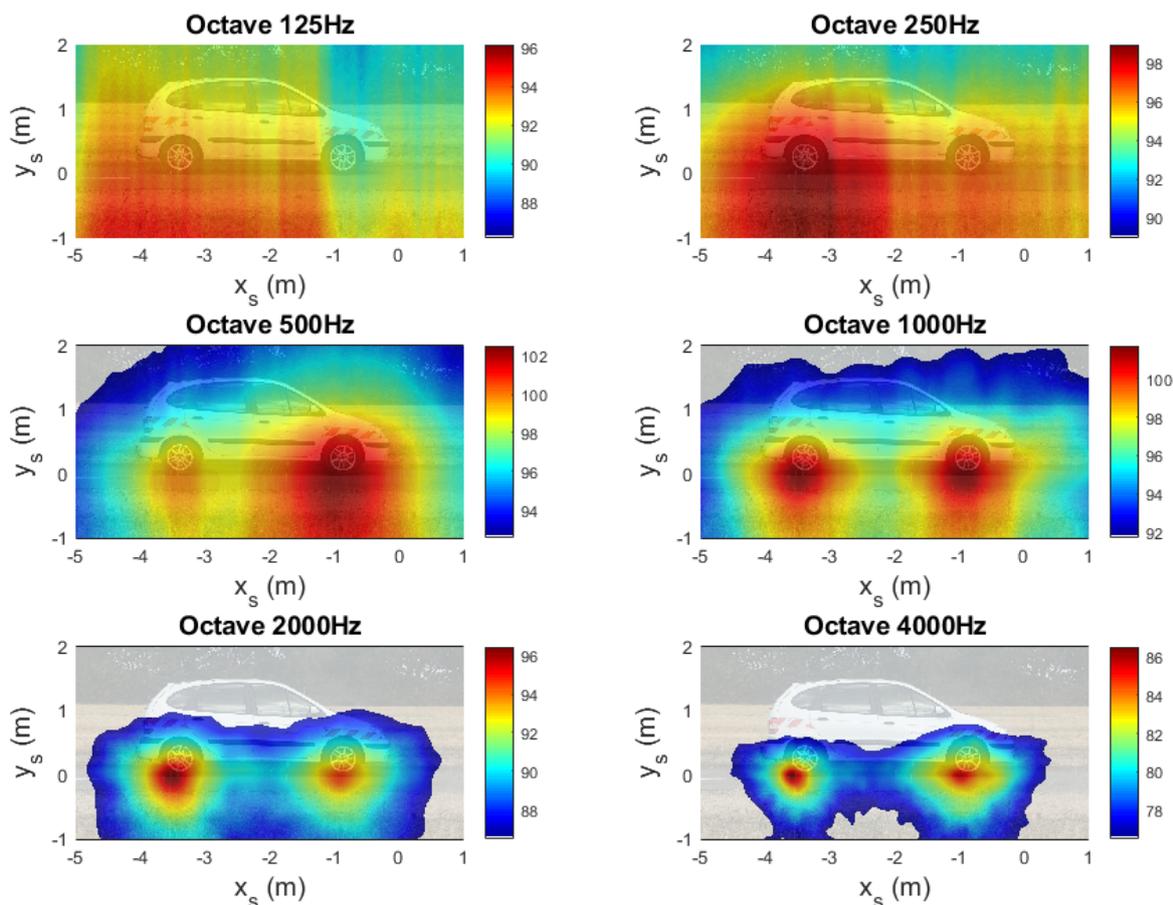


FIGURE 4.17 – Formation de voies avec suivi de source du véhicule au passage. Vitesse 50 km.h^{-1} , sans source B&K. Échelle de couleur : niveau des sources (dB), dynamique : 10 dB.

MSA-PSF

De la même manière que dans la section précédente, les hypothèses de la méthode ne sont pas rigoureusement vérifiées. Dans la bande d'octave centrée sur 500 Hz, la source au niveau de la roue avant du véhicule est à un niveau supérieur à celui de la roue arrière, de même que pour la FV (fig. 4.18). Les niveaux sont cependant globalement sous-estimés par rapport à la FV, comme dans la section précédente. On repère, sur l'extrémité gauche du cadre, des sources secondaires non physiques qui rendent compte du niveau à basse fréquence. La localisation des sources n'est pas très satisfaisante dans ces conditions, avec la présence de sources secondaires ainsi qu'un léger étalement des zones sources dans les deux dernières bandes d'octave.

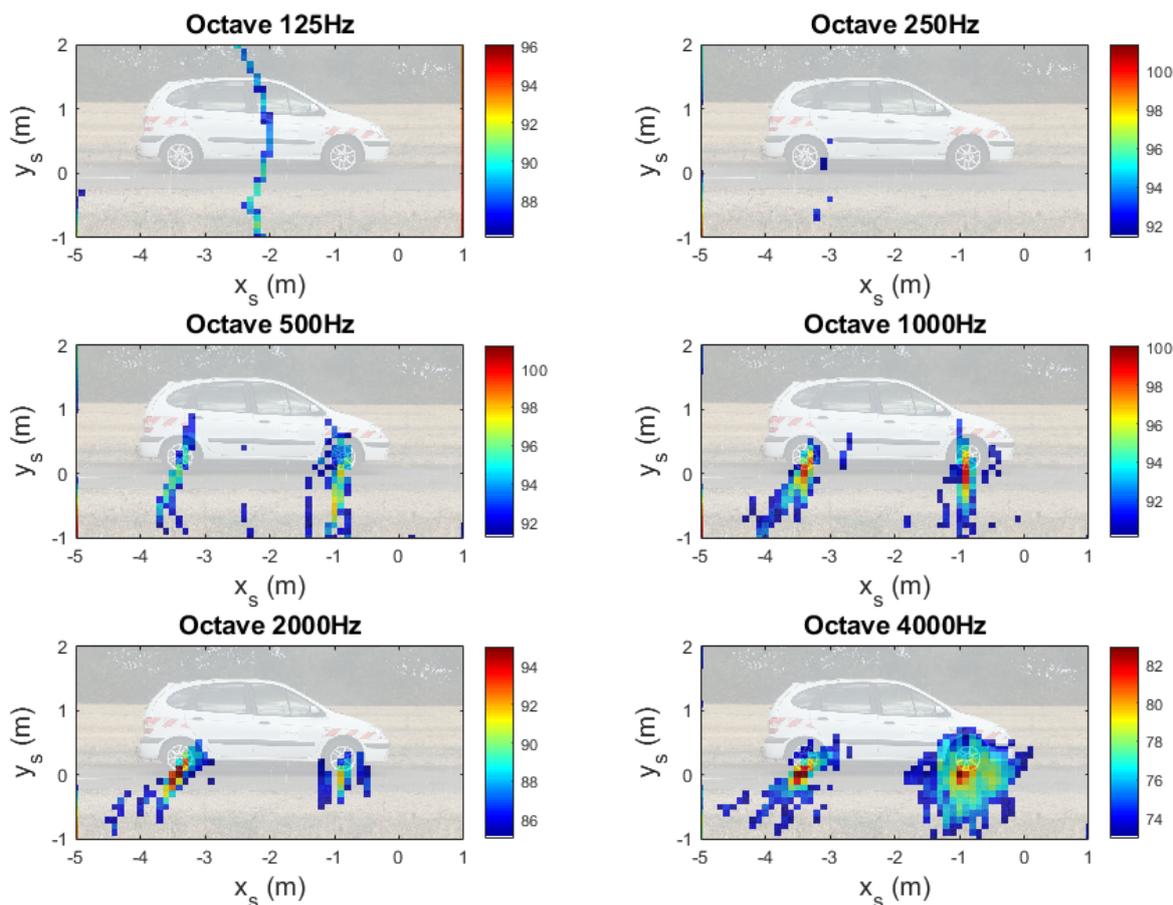


FIGURE 4.18 – Cartographie du véhicule au passage obtenue avec MSA-PSF (déconvolution). Vitesse 50 km.h^{-1} , sans source B&K. Échelle de couleur : niveau des sources (dB), dynamique : 10 dB.

CLEANT

Dans cette configuration sans la source B&K, CLEANT identifie précisément les deux zones sources principales au niveau des roues, dans toutes les bandes d'octave (fig. 4.19). La tendance observée dans la formation de voies avec suivi de source est conservée : la zone source de la roue arrière a un niveau plus élevé qu'à l'avant dans l'octave 250 Hz, plus faible à 500 Hz puis

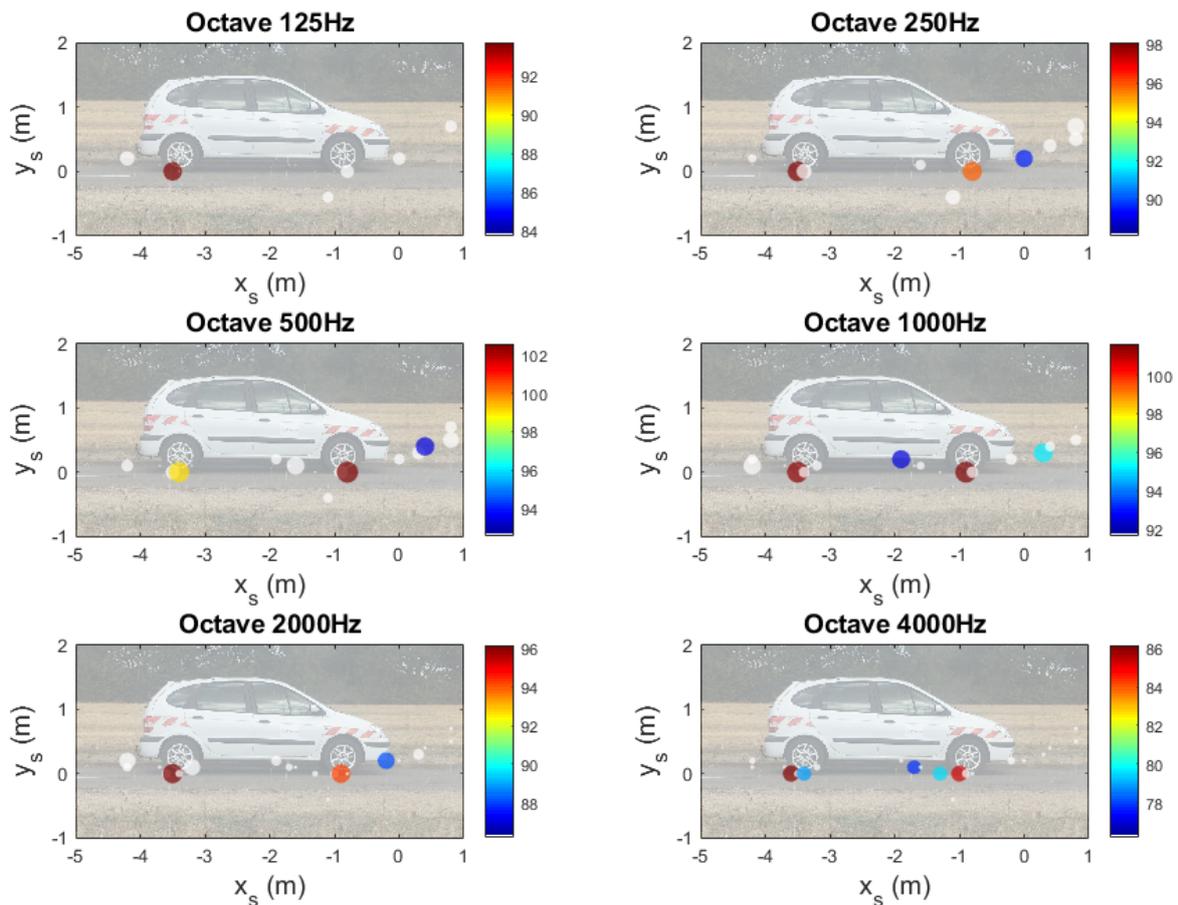


FIGURE 4.19 – Cartographie du véhicule au passage obtenue avec CLEANT (filtrage par octaves). Vitesse $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, sans source B&K. Échelle de couleur : niveau des sources (dB), dynamique : 10 dB.

équivalent à 1000 Hz. On constate l'apparition de quelques sources secondaires, dont certaines sont relativement éloignées des zones sources et dues à l'étalement du niveau par la formation de voies, et d'autres plus proches de la roue et qui peuvent représenter un comportement particulier des sources physiques (moteur, roulement). La provenance de ces sources secondaires pourra être vérifiée à l'aide d'une analyse par cohérence avec les signaux de mesure embarquée (section 4.5.2).

Synthèse des résultats de mesure sans source contrôlée

Cette configuration est la plus proche des conditions réelles de passage d'un véhicule. Il s'agit donc de la dernière étape de validation des méthodes.

On note peu d'évolution sur le résultat de formation de voies par rapport au cas précédent avec source B&K, si ce n'est que les zones sources situées au niveau des passages de roues sont à présent identifiées dans l'octave 2000 Hz, puisqu'elles sont à présent les sources principales.

De même pour MSA-PSF, la seule différence notable est l'apparition des zones sources au niveau des passages de roues dans la bande 2000 Hz en l'absence de la source B&K. On constate toujours la présence de nombreuses sources secondaires, ainsi qu'une déformation des sources par

le mouvement et une sous-estimation significative des niveaux des sources, illustrant l'adaptation discutable de la méthode à ce contexte routier.

Les résultats de CLEAN-T sont tout aussi intéressants que dans la configuration précédente, en particulier parce que les sources situées dans les passages de roues sont à présent bien identifiées quelle que soit la bande d'octave considérée, là où elles étaient un peu en retrait à 2000 Hz en présence de la source contrôlée. De plus, les niveaux estimés des sources sont en bonne cohérence avec le résultat de la FV.

4.4.4 Bilan de la mesure au passage

Deux cas ont été présentés en mesure dynamique : le premier dans lequel la source B&K située sur le toit émet un signal, le deuxième où elle est inactive. De même qu'en statique, la formation de voies permet d'identifier les sources avec d'autant plus de précision que la fréquence est élevée, et de dégager certaines tendances, comme la différence d'intensité du bruit au niveau des deux passages de roue selon l'octave considérée. On peut supposer que du bruit de moteur et d'échappement se mêle au bruit de roulement, mais il est impossible en l'état d'affirmer avec certitude d'où proviennent ces différences de niveau entre les deux zones.

La déconvolution de MSA-PSF permet d'affiner les cartographies, en proposant des zones de bruit avec une étendue restreinte, mais néanmoins quelque peu déformées et avec un certain nombre de sources secondaires parasites. En effet, on constate sur ce cas expérimental d'un véhicule routier que les craintes concernant la validité des hypothèses de la méthode dans ce contexte particulier étaient justifiées. La variation d'effet Doppler étant plus rapide, du fait de la courte distance entre le véhicule et l'antenne (comparé au cas de la mesure d'un avion par exemple), l'hypothèse d'invariance des paramètres distance et angle au sein d'un snapshot est mise à mal, et la durée des snapshots choisie pour satisfaire la condition $vT^{(e)} \ll D$ devrait probablement être plus sévère (plus qu'un facteur 10 d'écart), le problème étant de disposer d'un minimum de signal, en particulier aux vitesses élevées. La vitesse de 50 km.h⁻¹ reste toutefois suffisamment faible pour que le résultat de déconvolution de MSA-PSF soit exploitable, mais ne permet pas d'améliorer fondamentalement le résultat de FV pour séparer des sources proches telles que le bruit de moteur et de roulement. On a enfin noté une sous-estimation des niveaux des sources par rapport à la FV, effet en partie nuancé si l'on considère des zones-sources dans lesquelles les niveaux de sources voisines sont sommés, mais néanmoins significatif en particulier dans certaines octaves.

Enfin, CLEAN-T – dans sa version filtrée en fréquence selon les bandes d'octave affichées – identifie clairement les zones sources principales. La quantification est également très satisfaisante et correspond aux niveaux constatés dans la cartographie de formation de voie. On peut se satisfaire de localiser les sources au niveau des roues dans les deux premières bandes de fréquence, malgré la mauvaise résolution de la formation de voies. Un certain nombre de sources secondaires apparaissent, certaines étant plutôt des artefacts numériques (car situés en dehors de la zone couverte par le véhicule), et d'autres pouvant être le reflet du comportement des sources physiques. L'utilisation de signaux de référence permet d'étudier ces sources secondaires et valider ou non cette hypothèse, et ce point particulier fait l'objet de la section suivante. On note pour finir que dans la configuration mobile avec la source B&K, la zone source de la roue avant n'a pas été identifiée dans la dernière octave : cela peut être amélioré par l'ajustement du

facteur de boucle et des critères d'arrêt.

4.5 Utilisation des signaux de référence pour la séparation de sources

Jusqu'à présent, les résultats de MSA-PSF et de CLEAN-T par rapport à la formation de voies classique ont essentiellement permis de proposer une cartographie avec des sources plus "localisées", c'est-à-dire avec étendue spatiale en accord avec l'étendue réelle des sources. Cela apporte une précision supplémentaire pour la localisation des sources, mais pas toujours suffisamment pour différencier la contribution de certaines sources proches telles que le bruit de moteur et celui de roulement à l'avant du véhicule.

Un atout de CLEAN-T est d'offrir une possibilité d'amélioration dans ce sens, en utilisant une méthode de séparation de sources incohérentes telle que décrite dans le Chapitre 1 et testée notamment dans le troisième chapitre sur une expérience à échelle réduite de sources au passage. Dans le but de mettre en pratique cette approche, des capteurs embarqués ont été placés sur le véhicule afin de mesurer des signaux pouvant servir de références associées à quelques contributions physiques.

4.5.1 Cas statique : zone du passage de roue

Configuration testée

Dans la configuration statique analysée, la source B&K sans le flexible est placée sur le sol contre le pneu de la roue avant, comme illustré par la figure 4.8. On considère ici la configuration 9 du tableau 4.3, dans laquelle le moteur est en marche à 2000 tr.min^{-1} . La source B&K émet un signal monochromatique de fréquence 2 kHz, sans harmonique significative en l'absence du flexible. La figure 4.20 présente la cartographie de formation de voies à l'échelle du véhicule dans cette configuration. Dans les deux premières bandes d'octave, la majorité du bruit est située vers l'arrière du véhicule, ce qui peut être une indication que le bruit d'échappement prédomine à ces fréquences. Par ailleurs, le bruit provenant du moteur se situe plutôt sur l'avant de la roue (octaves 500 Hz, 1 kHz et 4 kHz) tandis que la source B&K est bien localisée vers l'arrière de cette roue à 2 kHz. À l'échelle des niveaux sonores représentés dans l'octave 2 kHz, la contribution moteur est indécélable et vraisemblablement dominée par les lobes secondaires de la source principale.

Pour l'application de CLEAN-T, une nouvelle grille-source ciblant la roue avant est définie, allant de -1,5 m à +0,5 m en abscisse, et de -1 m à +1 m en ordonnée, avec un pas de 5 cm. La zone affichée sur les cartographies est tronquée en ordonnée, puisqu'elle commence à -0,5 m. De manière analogue au cas statique déjà étudié lorsque la source B&K se trouvait sur le toit, la version non filtrée en fréquence de CLEAN-T avec le facteur de boucle et les critères d'arrêt choisis ne permet pas d'identifier d'autres sources que la source B&K. Le même filtrage fréquentiel par bandes d'octave, isolant le signal émis à 2 kHz, a donc été appliqué.

Sur les cartographies de CLEAN-T avec filtrage fréquentiel (fig. 4.21), on remarque que les niveaux présents dans les octaves 125 et 250 Hz sont relativement faibles par rapport à la formation de voies, car le niveau dans ces bandes est plus élevé vers l'arrière du véhicule et donc situé

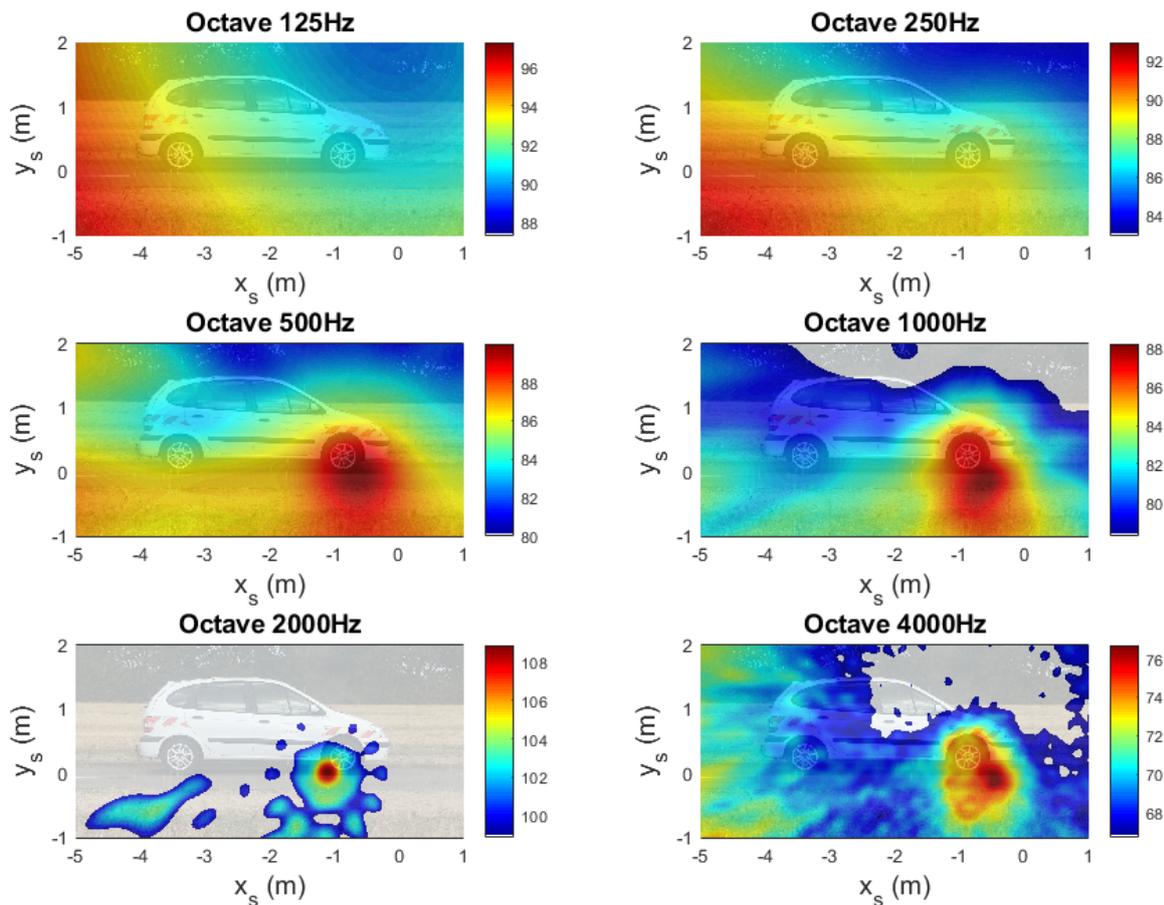


FIGURE 4.20 – Formation de voies du véhicule à l'arrêt, moteur à $2000 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$, la source étant contre la roue et émettant à une fréquence de 2 kHz. Échelle de couleur : niveau des sources (dB), dynamique : 10 dB.

en dehors de la grille-source utilisée. Dans l'ensemble des bandes d'octave, on repère des sources autour de la roue, en particulier vers le sol à gauche. Dans la bande 1000 Hz, une source est située vers l'avant de la roue, probablement issue de la zone inférieure du compartiment moteur et vue par réflexion sur le sol. Une source forte correspondant à la source B&K à gauche du pneu apparaît dans la bande d'octave centrée sur 2 kHz, à proximité d'autres sources identifiées dans les autres bandes.

Enfin, on peut remarquer que l'on retrouve des localisations identiques même dans des bandes d'analyse disjointes, bien qu'à des niveaux différents. Le fait de retrouver des sources communes aux mêmes positions dénote une certaine stabilité dans la localisation des sources.

Référencement

La figure 4.22 présente une "cartographie cohérente" avec la source B&K. La représentation diffère ici des cartographies de CLEANT présentées jusqu'à présent. En effet, la taille des points-sources affichées est toujours liée à leur niveau, mais désormais **leur couleur est liée à la**

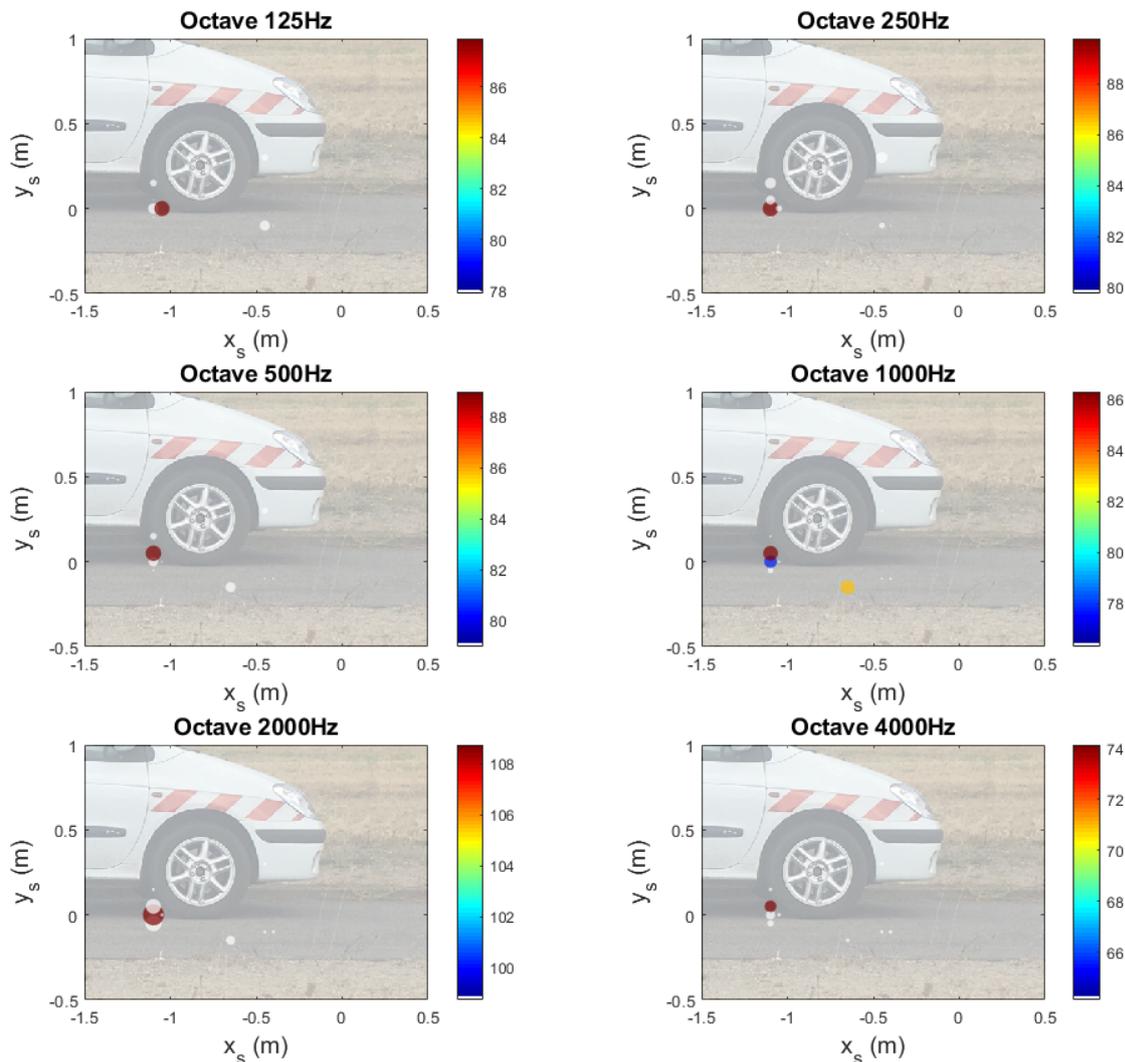


FIGURE 4.21 – Cartographie du véhicule à l'arrêt obtenue avec CLEAN (filtrage par octaves), moteur à 2000 tr.min⁻¹, la source étant contre la roue. Signal source sin 2 kHz. Échelle de couleur : niveau (dB), dynamique : 10 dB.

cohérence du signal correspondant avec un signal de référence. Dans une bande d'octave B considérée, la valeur indiquée par l'échelle de couleur est donnée pour un point-source i identifié par CLEAN par C_i :

$$C_i = \frac{\sum_{f \in B} \gamma_{i\text{ref}}(f) S_i(f)}{\sum_{f \in B} S_i(f)}$$

où $\gamma_{i\text{ref}}$ est la cohérence calculée entre le signal temporel extrait par CLEAN pour le point-source i et le signal de référence, et S_i est l'autospectre du signal du point-source i .

C_i donne une mesure de la proportion du signal reconstruit par CLEAN pour la source i cohérente avec le signal de référence choisi. Dans le cas de la figure 4.22, puisque la source

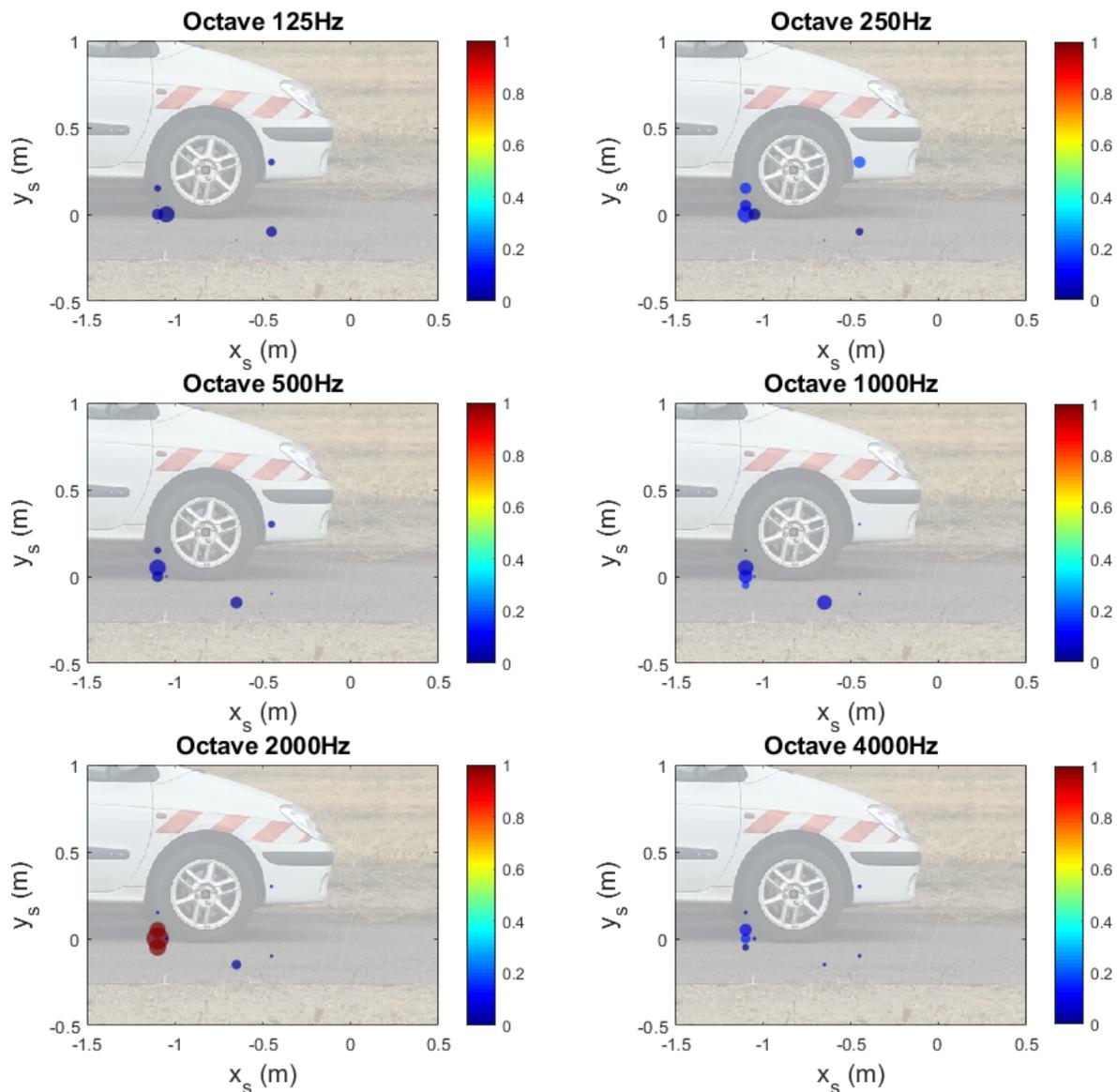


FIGURE 4.22 – Cartographie cohérente avec le signal générateur de la source B&K pour le véhicule à l’arrêt obtenue avec CLEAN (filtrage par octaves), la source étant contre la roue. Moteur à 2000 $\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$. Signal source sin 2 kHz. Échelle de couleur : puissance cohérente normalisée dans la bande d’octave.

B&K n’est plus équipée du tuyau flexible, on peut utiliser directement le signal délivré par le générateur comme référence, ce qui présente l’avantage de disposer d’un signal de référence totalement décorrélié de toute source du véhicule. Ainsi, on remarque que les sources principales situées sur la gauche de la roue sont cohérentes avec la référence, avec une cohérence maximale dans la bande de fréquence centrée sur 2 kHz et quasi-nulle dans les autres bandes.

La figure 4.23 montre la cartographie cohérente avec le microphone situé dans le comparti-

ment moteur du véhicule. On constate que plusieurs sources sont cohérentes avec ce signal, avec une valeur plus ou moins importante selon la bande d'octave. La valeur maximale de la cohérence est atteinte dans la bande centrée sur 250 Hz, puis dans l'octave 1000 Hz. Les cartographies cohérentes avec les accéléromètres sont présentées en Annexe C et apportent une perspective sur le choix du type de capteurs, de leur nombre ainsi que de leur emplacement selon le type d'information voulue.

L'intérêt de la cartographie 4.23 présentée ici est d'illustrer l'un des problèmes pratiques qui se posent pour ce genre de méthodes, en l'occurrence la mesure des signaux de référence. Comme cela a été évoqué au premier chapitre dans la section 1.3.1, la valeur de la cohérence peut être faible dans certains cas, l'un d'eux étant la contribution d'autres sources dans la mesure de référence d'une source d'intérêt. Dans l'exemple présent, le fait d'utiliser un microphone devait permettre de capter un maximum du signal émis par le GMP, avec le risque de capter la contribution d'autres sources du véhicule (source B&K par exemple). Au contraire, les accéléromètres ne sont liés qu'au GMP, mais peuvent ne représenter qu'une part du bruit total émis par le moteur. De plus, il serait intéressant dans de futurs travaux d'exploiter la notion de cohérence multiple pour l'étude de ces contributions particulières.

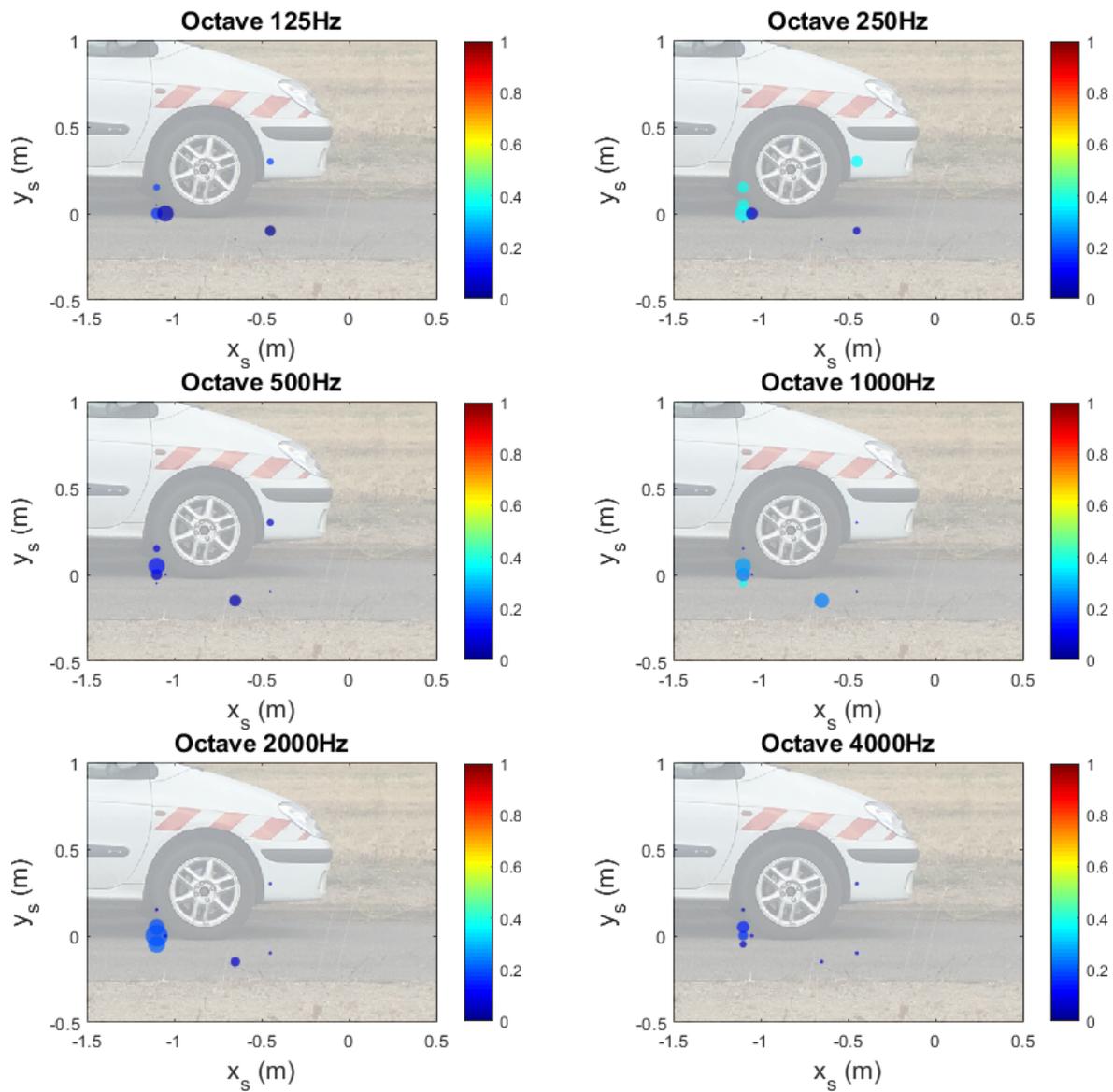


FIGURE 4.23 – Cartographie cohérente avec le signal du microphone du compartiment moteur du véhicule à l'arrêt obtenue avec CLEAN (filtrage par octaves), la source étant contre la roue. Moteur à 2000 tr.min⁻¹. Signal source sin 2 kHz. Échelle de couleur : puissance cohérente normalisée dans la bande d'octave.

4.5.2 Cas mobile

Passage avec source contrôlée

Dans le cas simple de la présence de la source B&K, on cherche à déterminer pour chaque source identifiée quelle part du signal est cohérente avec la source B&K. Considérons donc à nouveau la configuration 8 du tableau 4.4, dans laquelle le véhicule se déplace à 50 km.h^{-1} et la source émet un sinus à 2 kHz (à rapprocher de la figure 4.16).

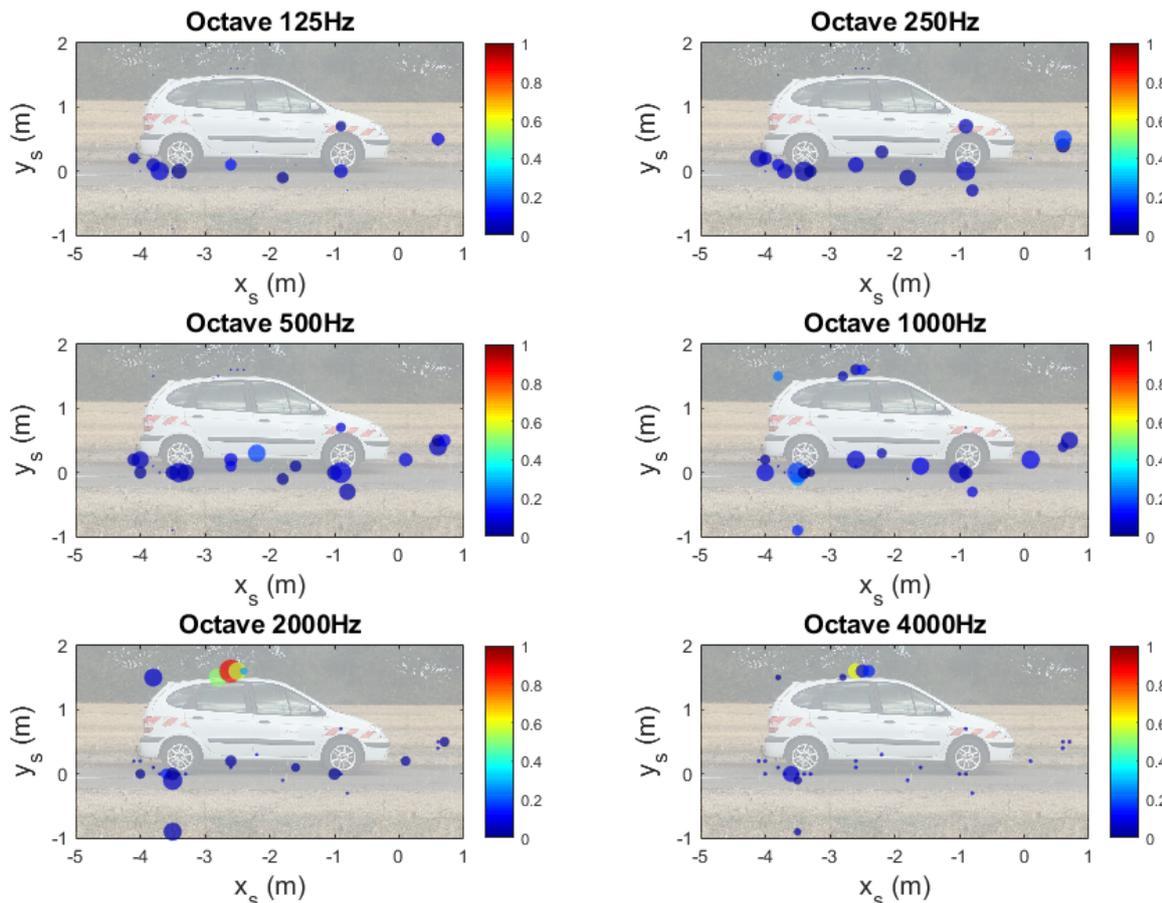


FIGURE 4.24 – Cartographie cohérente avec le signal microphone en sortie du flexible de la source B&K pour le véhicule au passage, obtenue avec CLEAN (filtrage par octaves). Vitesse 50 km.h^{-1} , signal source $\sin 2 \text{ kHz}$. Échelle de couleur : puissance cohérente normalisée dans la bande d'octave.

Affichons tout d'abord la cohérence par rapport au signal de référence capté par le microphone situé en sortie du flexible de la source B&K (fig. 4.24). Comme on pouvait s'y attendre, la cohérence est maximale dans la bande d'octave centrée sur 2 kHz au niveau de la source B&K sur le toit du véhicule, et relativement importante dans l'octave 4 kHz à la même position (présence de l'harmonique à cette fréquence). Le fait que seule la source identifiée par CLEAN qui correspond à la source B&K ait une cohérence significative permet de supposer que le microphone en sortie du flexible n'a pas capté de signal provenant des autres sources du véhicule.

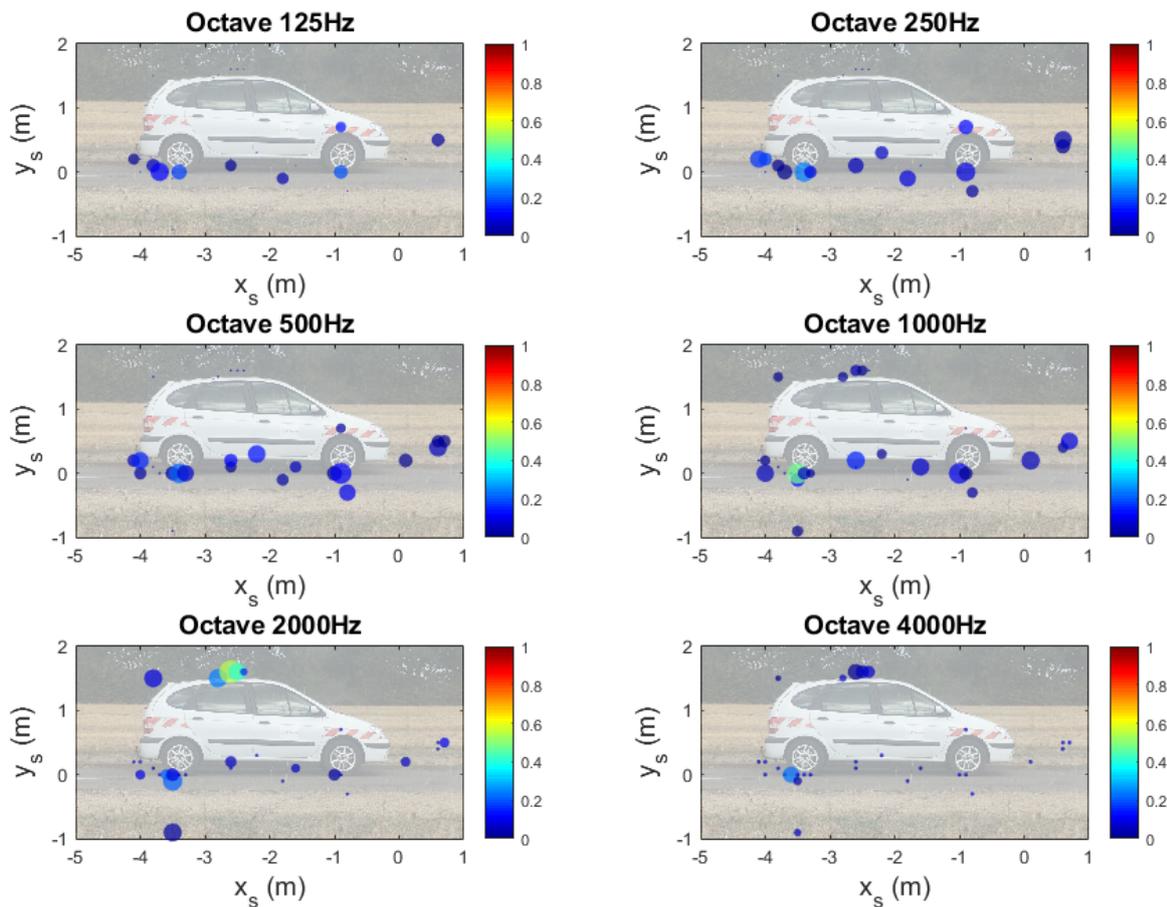


FIGURE 4.25 – Cartographie cohérente avec le signal du microphone situé à l’arrière de la roue du véhicule au passage, obtenue avec CLEAN-T (filtrage par octaves). Vitesse $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, signal source $\sin 2 \text{ kHz}$. Échelle de couleur : puissance cohérente normalisée dans la bande d’octave.

A contrario, si l’on examine la cartographie obtenue en cohérence avec le signal capté par le microphone situé à l’arrière de la roue (fig. 4.25), on remarque que dans la bande centrée sur 2 kHz la source sur le toit a une cohérence plus élevée – bien que médiocre – avec le signal de référence (capté au niveau de la roue arrière) que la source qui correspond théoriquement à cette référence. C’est une indication que le microphone situé vers l’arrière de la roue, qui est légèrement déporté vers l’extérieur et dépassant le bord du pneu, capte non seulement du bruit de roulement, mais aussi du signal provenant de la source sur le toit. On observe par ailleurs qu’une partie importante du signal de la source identifiée au niveau de la roue arrière est cohérente avec le signal capté par le microphone, dans la bande centrée sur 1000 Hz où il est bien connu que le bruit de roulement a sa contribution principale.

Passage sans source contrôlée

Intéressons-nous à présent au passage du véhicule sans la source B&K, soit la configuration 2 du tableau 4.4 (à rapprocher de la figure 4.19). La première cartographie présentée montre la cohérence des sources identifiées par CLEAN-T avec le signal capté par le microphone à l’arrière

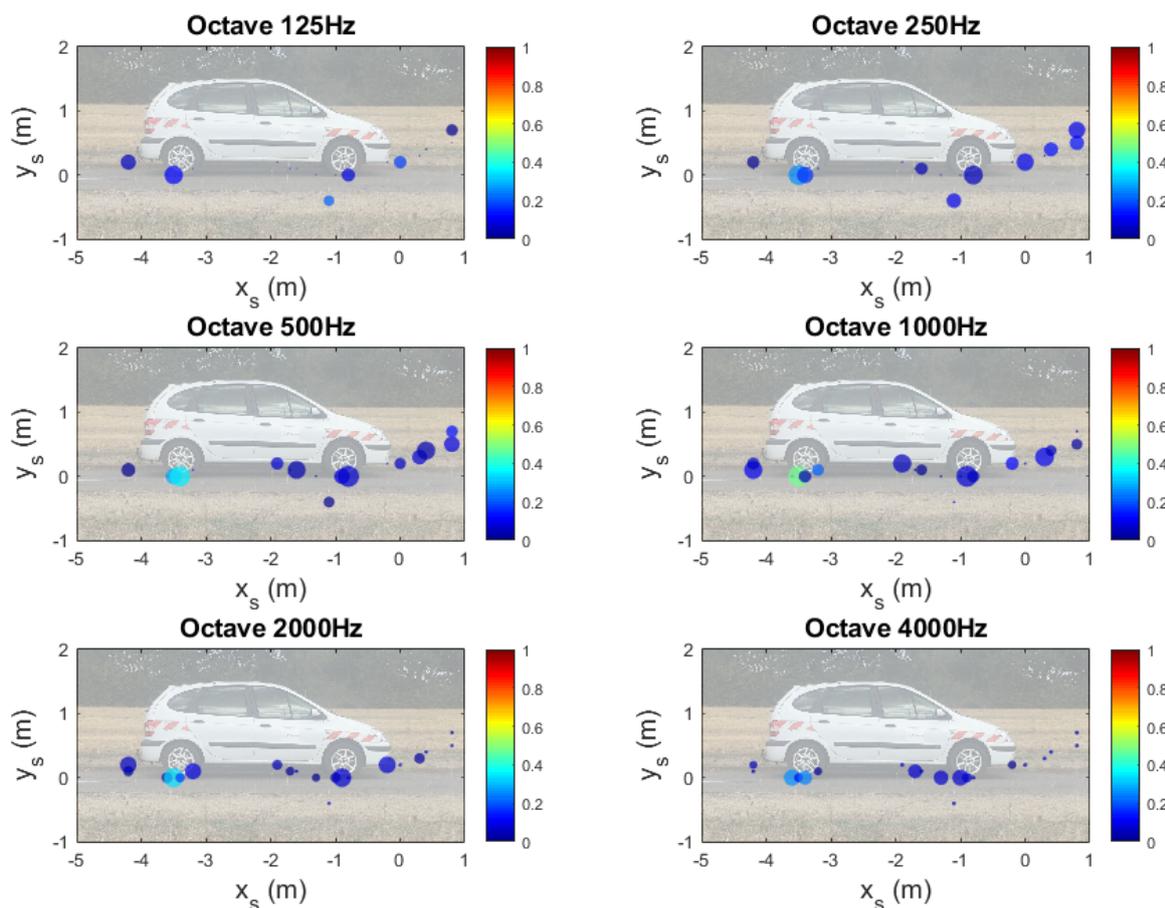


FIGURE 4.26 – Cartographie cohérente avec le signal du microphone situé à l’arrière de la roue du véhicule au passage, obtenue avec CLEAN (filtrage par octaves). Vitesse 50 km.h^{-1} , source B&K inactive. Échelle de couleur : puissance cohérente normalisée dans la bande d’octave.

de la roue (fig. 4.26). On constate que celle-ci est maximale pour la source correspondante, dans toutes les bandes d’octave analysées, et qu’elle est plus importante dans la bande centrée sur 1 kHz. De plus, la source identifiée au niveau de la roue avant n’est pas cohérente avec ce signal, ce qui est logique puisque les bruits de roulement des deux roues sont décorrélés.

La cartographie suivante (fig. 4.27) illustre une problématique sur la manière de représenter les résultats en cohérence avec une référence. Cette figure présente la cartographie cohérente avec le signal capté par le microphone situé dans le compartiment moteur, censé rendre compte du bruit de moteur⁴. Or, la totalité des sources identifiées dans toutes les bandes d’octave présentent une puissance cohérente normalisée extrêmement faible avec le signal capté par le microphone du moteur.

Le fait de présenter une puissance cohérente normalisée dans une octave permet d’estimer la proportion du signal reconstruit par CLEAN cohérente avec le signal de référence choisi.

4. Les résultats obtenus en utilisant les signaux des accéléromètres sont similaires à ceux obtenus avec le microphone, ils ne sont donc ni présentés ni discutés ici.

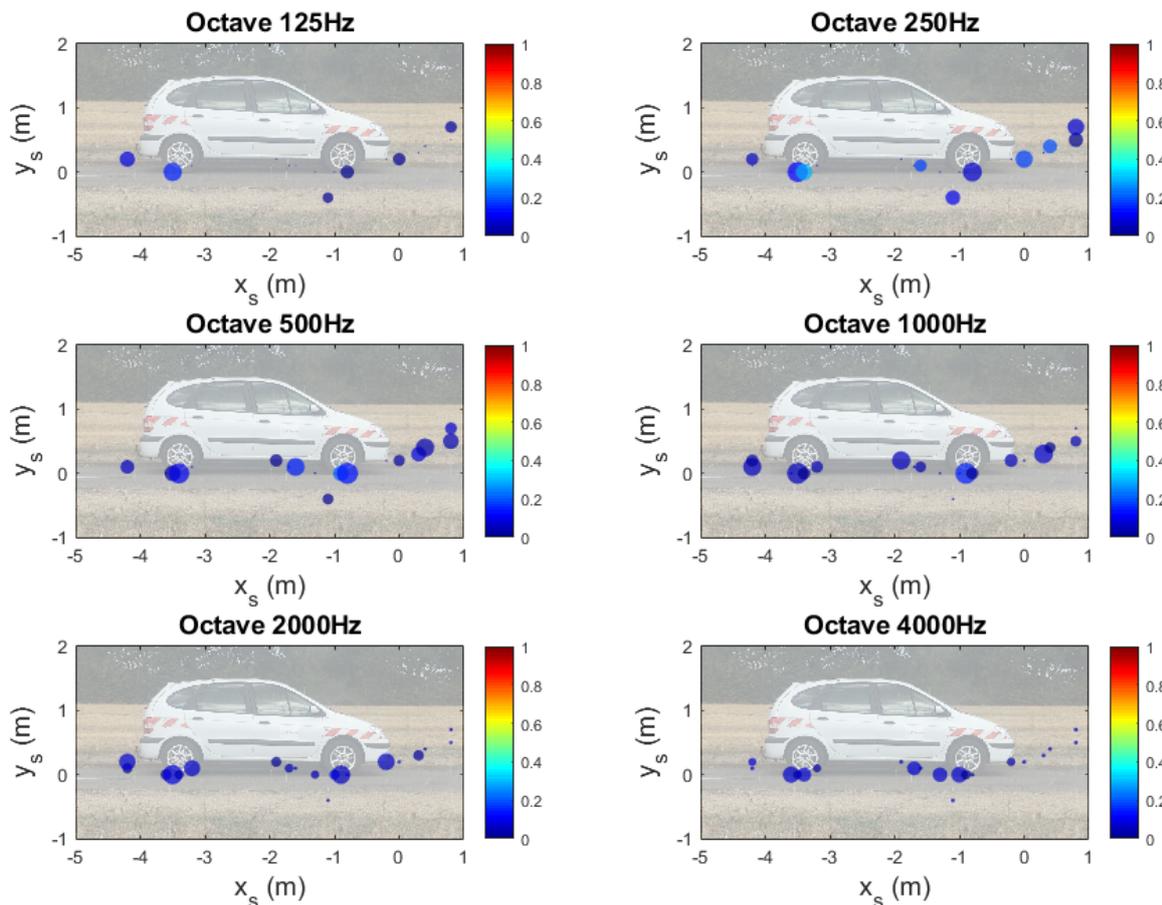


FIGURE 4.27 – Cartographie cohérente avec le signal du microphone situé dans le compartiment moteur du véhicule au passage, obtenue avec CLEAN (filtrage par octaves). Vitesse 50 km.h^{-1} , source B&K inactive. Échelle de couleur : puissance cohérente normalisée dans la bande d'octave.

Cependant, pour un même point-source qui serait composé d'une source de très fort niveau et d'une source bien plus faible, par exemple le bruit de roulement par rapport au bruit de moteur, cette normalisation peut faire chuter la valeur de cet indicateur, donnant l'impression que la source identifiée est peu voire pas cohérente avec la référence. On peut obtenir une information complémentaire sur la présence ou non de signal cohérent avec une référence dans certaines bandes d'octave en traçant la puissance cohérente non normalisée, à comparer avec la cartographie CLEAN sans cohérence (fig. 4.19).

Dans la figure 4.28, la puissance cohérente non normalisée est tracée pour le même passage du véhicule sans la source B&K. Si l'on se focalise par exemple sur l'octave centrée sur 1 kHz, on remarque que le niveau trouvé sur la roue avant est assez nettement supérieur à celui trouvé sur la roue arrière, tandis que sans la cohérence (fig. 4.19), ces niveaux étaient équivalents dans cette octave. Cela montre que le point-source identifié sur la roue arrière n'est pas cohérent avec le signal du microphone sous le capot du véhicule, tandis que le point-source à l'avant l'est au contraire en partie, dans cette bande de fréquence. Cette information n'est pas visible dans la figure 4.27 qui laisserait penser qu'aucun de ces points-sources n'est cohérent, même

partiellement, avec le signal mesuré dans le compartiment moteur. On reste également limité par la courte durée du passage du véhicule pour l'évaluation de la cohérence : la possibilité d'un plus grand nombre de moyennes permettrait d'améliorer son calcul, ce qui diminuerait de manière plus efficace les sources incohérentes avec la référence.

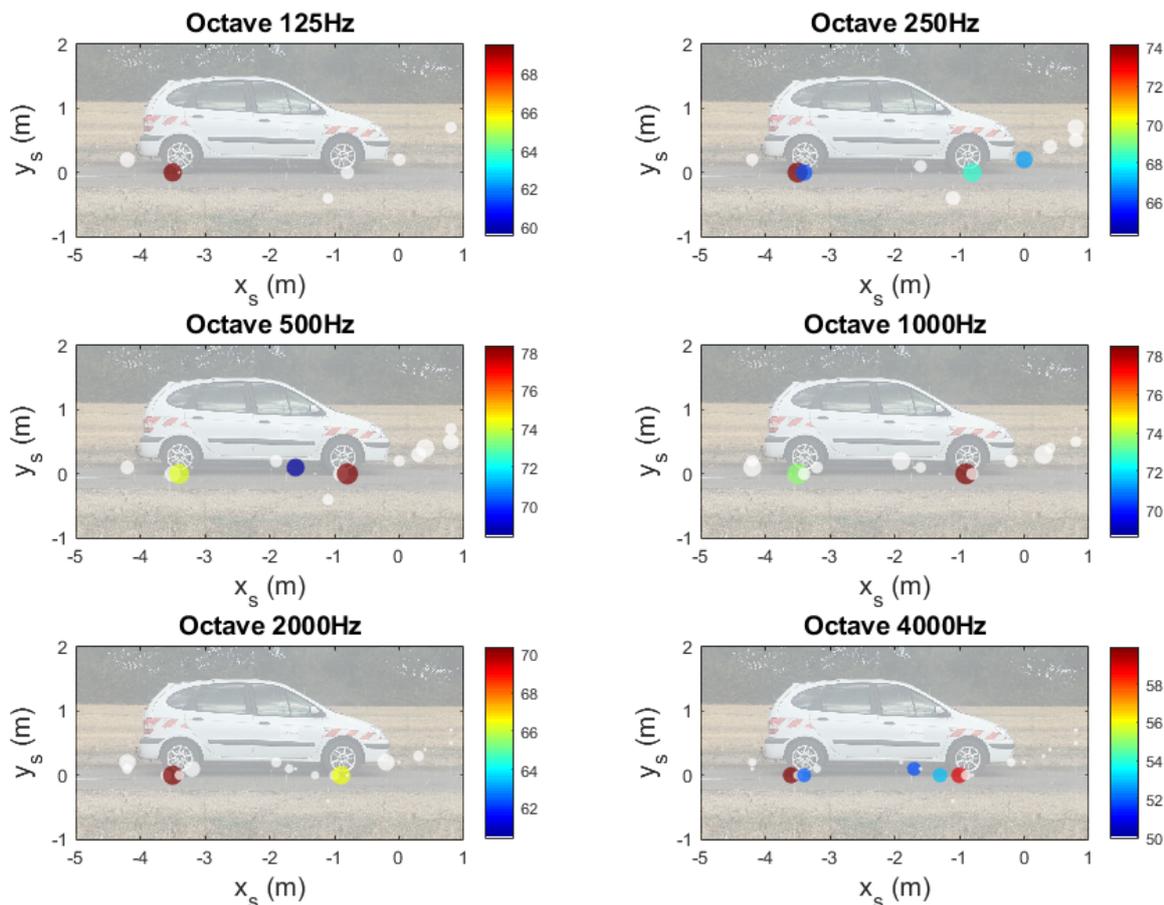


FIGURE 4.28 – Cartographie cohérente avec le signal du microphone situé dans le compartiment moteur du véhicule au passage, obtenue avec CLEAN (filtrage par octaves). Vitesse 50 km.h^{-1} , source B&K inactive. Échelle de couleur : puissance cohérente dans la bande d'octave.

Dans ce cas précis, on peut chercher à déterminer avec plus de précision quelle est la part du bruit de moteur et du bruit de roulement dans la zone correspondant au passage de roue avant. Cependant, le niveau de précision des cartographies présentées ne permet pas encore de réaliser cet objectif. En revanche, on peut envisager de jouer sur le facteur de boucle de CLEAN, qui permet en théorie de mieux rendre compte de sources étendues en trouvant un nombre plus important de sources voisines. Cela augmente de manière conséquente le temps de calcul, et une étude spécifique visant à trouver une valeur optimale de ce paramètre pour ce cas particulier d'application devrait être menée pour chercher à améliorer l'identification de CLEAN. De plus, on pourrait également concentrer le traitement sur une zone plus proche du passage de roue avant en utilisant un pas de grille plus fin. La difficulté est de trouver une étendue suffisamment petite pour la grille-source afin de contenir le temps de calcul nécessaire dans le cas d'un facteur

de boucle plus faible et d'un pas de grille plus fin, tout en ayant une étendue assez grande pour que la méthode dispose de suffisamment d'information pour opérer correctement.

4.5.3 Bilan du référencement pour la séparation de sources

L'utilisation des signaux-sources temporels reconstruits par la formation de voies dans CLEANT conjointement à des mesures embarquées servant de référence pour la séparation des sources identifiées s'est montrée encourageante. Tout d'abord dans un cas statique, avec une source facilement identifiable et forte (source B&K), on peut aisément la mettre en valeur tout en "éteignant" les sources non cohérentes avec la référence (ici directement le signal fourni à la source). L'application à une source moins maîtrisée (ici le bruit du moteur) donne un résultat plus mitigé, dans la mesure où certains points-sources sont effectivement mis en valeur mais avec une cohérence relativement faible : se pose la problématique de la mesure de référence, ici faite au moyen d'un microphone placé dans le compartiment moteur, mais qui peut avoir été "contaminé" par le signal émis par la source. De plus, cette question non-triviale de la mesure de référence concerne également la représentativité d'une mesure à l'aide d'un capteur unique pour une source complexe telle que le bruit de moteur. L'utilisation de cohérences multiples pourra être explorée pour une amélioration de ce point.

Dans un cas mobile, la séparation de la source B&K des autres sources identifiées est encore une fois convaincante, ce qui est principalement dû à la relative facilité d'en réaliser une mesure embarquée fiable. On remarque cependant que, bien que la cohérence du point-source identifié comme étant la source B&K soit relativement élevée, elle ne l'est pas tout à fait autant que dans le cas statique : cela illustre une deuxième difficulté dans l'application de ce type d'approche, en l'occurrence la courte durée des signaux qui ne permet pas une estimation optimale de la cohérence. Tout comme dans le cas statique, la référence à une source moins maîtrisée (ici le bruit de roulement arrière) donne un résultat contrasté bien qu'intéressant : il souligne une fois de plus la difficulté de la mesure embarquée, puisque dans ce cas précis, le microphone situé au niveau de la roue arrière capte également du signal émis par la source B&K, qui se trouve ainsi également mise en valeur.

Sans source B&K, cette dernière application est plus convaincante, la zone de la roue arrière étant bien mise en valeur, bien que la valeur de la cohérence soit médiocre. En revanche, la tentative de réaliser une cartographie de puissance cohérente normalisée avec comme référence le signal provenant du microphone dans le compartiment moteur illustre une limite de cette représentation : pour un même point-source composé d'une source de très fort niveau et d'une source plus faible, par exemple le bruit de roulement par rapport au bruit de moteur, la normalisation de la puissance cohérente dans la bande de fréquence peut faire chuter la valeur de cet indicateur. Nous avons alors montré qu'il est également intéressant de consulter des cartographies cohérentes sans normalisation pour identifier les points-sources cohérents avec une telle référence, sans pour autant pouvoir quantifier sa contribution à la source identifiée.

4.6 Synthèse de l'application des méthodes en conditions réelles

Dans ce chapitre, une expérience de bruit routier au passage d'un véhicule en conditions réelles a été présentée. Le véhicule employé était équipé de capteurs embarqués dans l'optique

d'appliquer des méthodes de séparation de sources faisant intervenir la notion de cohérence avec un signal de référence. De plus, une source sonore contrôlée (source B&K) était également fixée au véhicule. Deux situations statiques, avec véhicule à l'arrêt et moteur en marche, ont été testées en plus des passages du véhicule à différentes vitesses. La source B&K émettait depuis le toit dans la première situation, et était disposée contre le pneu de la roue avant dans la deuxième, afin de la rapprocher du bruit de moteur et la positionner dans une zone d'émission du bruit de roulement.

La mesure en statique a permis d'identifier l'un des problèmes potentiels en utilisant CLEAN-T sous sa forme non filtrée en fréquence, donc en large bande, dont il a été également fait mention dans les deuxième et troisième chapitres. Ici, la source B&K émettant un sinus à une fréquence de 2 kHz à un niveau bien plus élevé que le bruit du moteur, ce dernier n'était pas identifié par CLEAN-T. L'utilisation d'un filtrage fréquentiel isolant la fréquence de la source B&K a permis de résoudre cette difficulté. Les trois méthodes testées donnent ainsi des résultats corrects, bien qu'encore un peu éloignés des objectifs de la thèse (en particulier la déconvolution semble particulièrement sensible à un écart du modèle de la PSF par rapport à la réalité de la mesure). Si ces résultats valident les méthodes dans ce contexte statique, le véritable enjeu se situe dans les sources en mouvement.

La formation de voies avec suivi de source permet une dédopplérisation efficace du véhicule et de localiser les différentes zones sources principales. Sa mauvaise résolution en basse fréquence est cependant problématique, et influe aussi sur le résultat de MSA-PSF et CLEAN-T. Nous avons pu constater pour la première que ses hypothèses sont difficilement vérifiées dans ce contexte routier. Ses résultats ne sont pas tout à fait satisfaisants dans un cas mobile, en présentant des zones sources parasitées de sources secondaires de niveaux relativement élevés. CLEAN-T permet de localiser correctement les sources principales, même dans les bandes de fréquence plus basses, ce qui représente une amélioration sensible de la formation de voies.

Bien que les résultats de ces méthodes d'imagerie soient relativement satisfaisants pour ce véhicule au passage, certains laissent à désirer par rapport à nos attentes. MSA-PSF en particulier ne semble pas être suffisamment performante pour constituer une amélioration significative de la formation de voies. Les résultats fournis par CLEAN-T sont plus encourageants, en particulier parce qu'un certain nombre de pistes d'amélioration existent pour cette méthode qui pourra faire l'objet d'une étude plus poussée. Les points soulevés concernent en particulier le modèle de propagation utilisé (point valable pour les trois méthodes), l'ajustement des critères d'arrêt et facteur de boucle, ainsi que la possibilité de faire un traitement sur des zones plus restreintes avec un pas de grille plus fin.

L'objectif de la thèse étant de séparer des sources proches voire géométriquement confondues, en particulier au niveau du passage de roue le bruit de roulement et celui provenant du GMP, une approche de séparation de source faisant intervenir la cohérence a été employée grâce à CLEAN-T. La deuxième situation de mesure statique, la source située contre le pneu, a été étudiée pour évaluer le potentiel d'une telle approche. Celle-ci a montré des résultats encourageants, à la condition de pouvoir effectuer un traitement avec un pas de grille suffisamment fin et d'avoir une bonne mesure de signaux de référence. Ce dernier point est primordial et pourra être approfondi dans de futurs travaux.

Enfin, cette approche par référencement a également été testée pour le véhicule en mouvement. Les résultats présentés ici sont aussi encourageants, la source B&K située sur le toit étant

bien localisée et mise en valeur par la cohérence avec le signal mesuré en sortie de source. La problématique de la prise de signal de référence a été à nouveau soulevée dans la cartographie cohérente avec le signal capté par l'un des microphones situés au niveau de la roue arrière. La difficulté d'utiliser ce genre d'approche a aussi été soulignée dans le cadre de mesure de véhicules au passage, du fait de la courte durée des signaux, particulièrement à grande vitesse.

Conclusions et perspectives

Cette thèse avait pour objectif de développer une méthode d'identification de sources adaptée à l'étude de véhicules routiers en conditions de fonctionnement variées. Il était également essentiel d'étudier les performances et limites de cette méthode, en utilisant des cas d'application de complexité croissante.

Conclusions

Le premier chapitre a permis de poser le cadre de l'étude, et en particulier de la situer parmi le spectre des méthodes d'imagerie acoustique existantes. Une description plus complète des méthodes adaptées au contexte des transports a été proposée, et les limites de celles-ci ont été soulignées, en particulier concernant la séparation de sources proches voire géométriquement confondues. Des approches en dehors du cadre de l'imagerie acoustique *stricto sensu* ont été présentées. Celles-ci ont pour but de déterminer les contributions de sources en utilisant la notion de cohérence avec un ou des signaux de référence.

Dans le deuxième chapitre, les spécificités du contexte routier ont été exposées, orientant le choix d'une méthode vers une approche temporelle. La méthode CLEAN-T développée dans le cadre de cette thèse a ainsi été proposée. Il s'agit d'une méthode opérant dans le domaine temporel, qui sélectionne de manière itérative les sources dominantes dans la cartographie de formation de voies. Cette méthode est paramétrable à la fois par un facteur de boucle, permettant de ne retirer qu'une partie de la contribution de la source dominante de chaque itération, et par un ou des critères d'arrêt dont le choix peut être essentiel dans les performances. De plus, si le traitement de CLEAN-T est intrinsèquement large bande, une version utilisant un filtrage fréquentiel a également été développée. Dans ce cas, différentes stratégies ont été proposées pour le choix des bandes de fréquences étudiées, en fonction du problème considéré.

CLEAN-T présente plusieurs avantages théoriques. Tout d'abord, en fin d'algorithme, on dispose de signaux temporels reconstruits des sources, ce qui ouvre des perspectives de développement intéressantes, notamment pour appliquer des stratégies de référencement pour la séparation de sources. Ensuite, le traitement large bande de CLEAN-T permet d'utiliser de l'information contenue dans les hautes fréquences pour compenser la mauvaise résolution de la formation de voies à basse fréquence et ainsi localiser précisément des sources sur l'intégralité de la gamme de fréquence étudiée. Cependant, cet avantage peut dans certaines circonstances être au contraire une source d'erreur. En effet, la présence d'une source de très fort niveau dans une certaine bande de fréquence peut éventuellement fausser le résultat d'autres sources proches et décaler leurs positions estimées. Ce genre de cas peut amener à utiliser la version filtrée en fréquence de CLEAN-T pour séparer le traitement de ladite source forte du reste des sources.

Une validation de la méthode par simulation a également été menée dans le deuxième chapitre. Il s'agit d'une première évaluation de ses performances en localisation et quantification sur un cas d'étude simple. Ces résultats ont été mis en comparaison avec la méthode de déconvolution de sources mobiles MSA-PSF, initialement développée dans le cadre des transports aériens, et dont l'applicabilité aux transports routiers est étudiée. Ces simulations ont donné des

résultats très encourageants pour CLEAN, avec cependant une certaine sensibilité à un écart du paramètre distance source-antenne dans le modèle de propagation utilisé par l'algorithme. De plus, l'importance de la largeur de la bande de fréquence utilisée dans le traitement de CLEAN a également été soulignée dans l'étude de la séparation de deux sources proches.

Une première application expérimentale en environnement contrôlé a été présentée dans le troisième chapitre. Cette expérience était une version à échelle réduite d'un véhicule routier au passage devant une antenne de microphones. Les performances de CLEAN ont été encourageantes à la fois en localisation et en quantification. Cela a aussi été l'occasion d'effectuer un premier test du filtrage de la cartographie obtenue par cohérence avec une mesure de référence d'une des sources étudiées. Ce cas d'étude, bien que relativement simple et en environnement contrôlé, a permis de valider l'utilisation de cette nouvelle méthode sur un cas concret. Ce chapitre a enfin été l'occasion de comparer CLEAN à MSA-PSF sur un cas expérimental, et d'illustrer leur différence fondamentale du fait du traitement large bande de CLEAN par rapport au traitement en bandes fines de MSA-PSF. L'exemple de la version filtrée en fréquence de CLEAN a montré l'apparition d'une "dispersion" (présence de sources secondaires) similaire au résultat de MSA-PSF dans le cas limite d'un filtre en bandes fines.

Enfin, les trois méthodes formation de voies, MSA-PSF et CLEAN ont été appliquées à un cas réel de véhicule routier dans le quatrième chapitre. Les conditions de mesure étaient en partie contrôlées, le véhicule circulant seul sur une route isolée du trafic et étant équipé en capteurs. De plus, une source maîtrisée était également embarquée pour servir de point de repère. Des configurations de mesure statique ont été réalisées pour la validation des méthodes. Le problème potentiel du traitement large bande de CLEAN, évoqué dans le deuxième chapitre, a été illustré par la source de contrôle émettant un signal tonal de forte intensité, masquant d'autres sources comme le bruit de moteur. L'utilisation du filtrage fréquentiel pour isoler le traitement de cette source a permis d'obtenir un résultat bien plus satisfaisant. Les configurations de passage mobile avec et sans la source de contrôle ont donné des résultats satisfaisants pour CLEAN, et ont permis en particulier de localiser correctement des sources à basse fréquence, là où la formation de voies ne donne pas de résultat exploitable. Cependant, les résultats bruts de CLEAN ne donnent pas véritablement plus d'information sur les sources que la formation de voies aux fréquences plus hautes, dans la mesure où différents points-sources ont été identifiés dans les zones source de la formation de voies, mais sans pouvoir attribuer ces points de manière certaine à des sources physiques particulières (roulement, moteur, etc.).

L'étude avec référencement présentée ensuite a montré le potentiel d'une telle approche couplée à CLEAN, d'abord dans une configuration statique où l'on se concentre sur l'avant du véhicule. Cela a permis de souligner l'importance du choix des capteurs embarqués et de leur emplacement. Il a également été question de la représentation de tels résultats dans le cas mobile, des informations complémentaires étant disponibles dans des cartographies représentant la puissance cohérente normalisée des sources et dans des cartographies donnant la puissance cohérente sans normalisation. Une limite a été identifiée en source mobile, pour un mouvement linéaire, liée à la courte durée des signaux reconstruits, ce qui dégrade l'estimation de la cohérence entre les signaux des sources identifiées et les signaux de référence.

Les résultats de MSA-PSF sur ce cas expérimental sont peu satisfaisants, car présentant un nombre non-négligeable de sources secondaires. Certaines sources ont été identifiées au niveau des bords de la grille-source, ce qui dénote une certaine sensibilité de la méthode à un écart du

modèle de propagation et de source avec la réalité de la mesure.

Par ailleurs, CLEANT n'est pas encore assez étudiée pour être utilisée seule en l'état. On recommande en effet de procéder par étapes : tout d'abord, la visualisation de la cartographie de formation de voies permet une première identification des principales zones sources, la méthode étant connue pour être robuste aux erreurs de modèle. Ensuite, CLEANT peut être appliquée dans sa version large bande, avec un facteur de boucle élevé (par exemple 1) pour diminuer le temps de calcul. La comparaison avec la cartographie de formation de voies permet l'interprétation du résultat de CLEANT, et de noter l'absence éventuelle de sources dans l'identification. Cela peut mener à différentes actions : filtrage fréquentiel, ajustement du facteur de boucle ou encore des critères d'arrêt de la méthode. Les premiers résultats de CLEANT sont très encourageants, mais il reste encore de nombreuses pistes de développement de la méthode elle-même et d'exploitation de la mesure sur véhicule routier d'autre part.

Perspectives

Plusieurs points d'amélioration sont possibles pour la méthode CLEANT développée et proposée dans cette thèse. Tout d'abord du point de vue du programme informatique, on peut envisager différentes stratégies pour implémenter le filtrage fréquentiel, ou encore la recherche de la source dominante (utilisation de différentes fonctionnelles de localisation à adapter selon le cas d'étude). D'un point de vue algorithmique, il pourrait être intéressant d'adapter la méthode HR-CLEAN-SC brièvement présentée dans l'état de l'art, puisqu'elle permet une meilleure identification de sources proches, et intégrer son principe dans CLEANT.

Une étude par simulations numériques avec un plus grand nombre de cas permettrait de mieux cerner les contours de la méthode. Les cas simulés envisagés dans ces travaux étant relativement simples, il serait intéressant d'étudier les performances et limites de la méthode dans des cas à plusieurs sources notamment, et faisant varier leur espacement et contenu spectral.

Pour ce qui est de l'exploitation des résultats de mesure, nous avons vu dans le quatrième chapitre certaines limites de CLEANT avec les choix de paramètres présentés. Ceux-ci ont été faits de manière à limiter le temps de calcul pour explorer un maximum de configurations possibles. Cependant, il a été souligné que le facteur de boucle de CLEANT, de même que les critères d'arrêt, peuvent jouer un rôle important dans le résultat et doivent être choisis après avoir testé différentes combinaisons pour correspondre au mieux à la mesure. La possibilité de "zoomer" sur une zone particulière du véhicule (typiquement la roue avant) a également été mentionnée, dans l'optique d'augmenter le nombre d'informations sur cette zone par rapport à la formation de voies. Cela sous-entend adapter les paramètres cités précédemment (facteur de boucle et critères d'arrêt) ainsi qu'utiliser un pas de grille-source plus fin. Le temps de calcul sera en conséquence plus long, mais pourrait donner des résultats plus intéressants.

En plus de ces recommandations portant sur le post-traitement de la mesure, l'utilisation de l'approche par cohérence avec des signaux de référence peut être améliorée en travaillant sur la mesure des signaux de références. Une étude spécifique sur le type de capteurs à privilégier, ainsi que sur leur emplacement, peut être menée. En particulier, ce choix dépend de l'objectif de la mesure : qu'il s'agisse d'obtenir dans la zone-source de la roue la contribution du GMP dans sa globalité, ou bien de déterminer la contribution de certains sous-systèmes (en rapport

avec la production de bruit dans le GMP présentée en première partie du premier chapitre). Toujours sur la partie référencement, l'utilisation des cohérences multiples n'a pas été testée ici, et représente une piste d'amélioration à étudier.

Fonction de localisation alternative

Comme il a été évoqué dans le deuxième chapitre, on peut rechercher quelle source retirer à chaque itération de CLEAN de différentes manières, selon différents critères¹. Dans cette thèse, le critère porte sur le maximum d'énergie d'une fonction de localisation. Cette fonction a été choisie comme étant directement la sortie de formation de voies dans les chapitres 2 et 3, et comme la fonction de localisation correspondant au maximum de vraisemblance dans le chapitre 4. Avec le choix de cette dernière, on privilégie les sources qui s'approchent le plus d'un modèle de source ponctuelle, au détriment d'autres modèles.

Dans le cas d'un véhicule routier, choisir la fonction correspondant au maximum de vraisemblance permet d'identifier des sources de bruit de roulement dans des bandes de fréquence basse, là où la formation de voies ne donne aucun résultat exploitable. Dans cette annexe sont présentés des résultats en configuration fixe et mobile de CLEAN en utilisant le maximum de la formation de voies comme fonction de localisation, pour illustrer l'effet d'un tel choix. Il sera nécessaire d'approfondir ce sujet dans le développement futur de la méthode.

A.1 Configuration statique

Examinons sur la figure A.1 le cas statique correspondant à la figure 4.21 du chapitre 4. Il s'agit d'une vue resserrée sur la roue avant du véhicule, la source B&K étant placée contre celle-ci. Si la source B&K est toujours localisée correctement, ici le bruit émis par le GMP est détecté en différents endroits du passage de roue et également au niveau du sol vers l'avant de la roue, probablement par réflexion sur le sol. Cela s'observe en particulier dans les octaves 500 et 1000 Hz, où la majorité du bruit était dans le chapitre 4 concentrée sur une source localisée à proximité de la source B&K. Cependant, l'utilisation de la fonction de localisation donnée par la FV ne permet pas ici d'identifier de source pertinente dans l'octave 125 Hz, et seules des sources faibles sont identifiées dans la bande centrée sur 250 Hz.

1. Cela est aussi vrai pour l'algorithme de déconvolution CLEAN

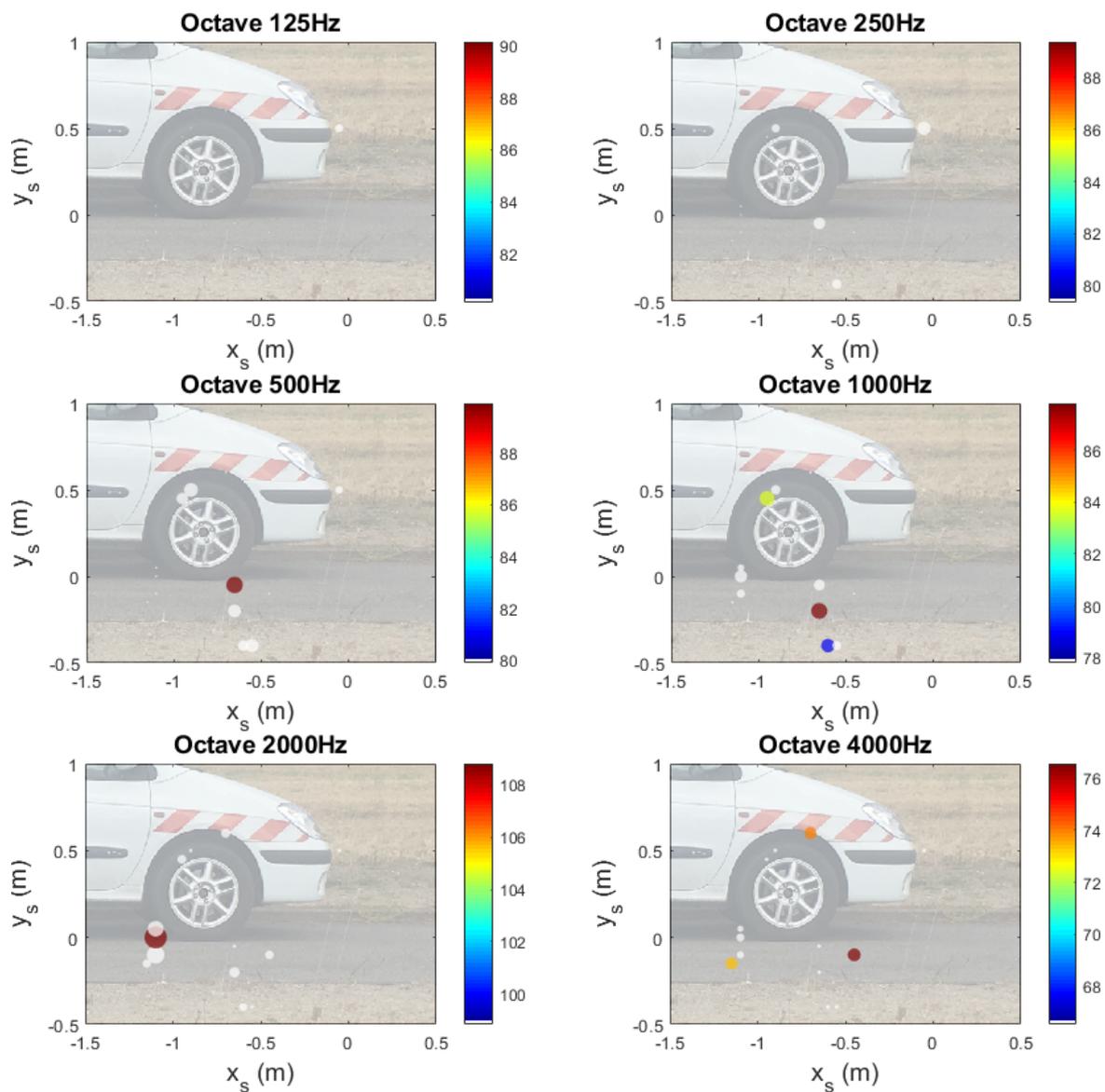


FIGURE A.1 – Cartographie du véhicule à l'arrêt obtenue avec CLEAN (filtrage par octaves) avec la sortie de FV comme fonction de localisation, moteur à 2000 tr.min⁻¹, la source étant contre la roue. Signal source sin 2 kHz. Échelle de couleur : niveau (dB), dynamique : 10 dB.

A.2 Configuration mobile

La figure A.2 correspond au cas mobile sans la source B&K, à comparer à la figure 4.19 du chapitre 4. On constate tout d'abord que les sources détectées à basse fréquence sont peu pertinentes, et ne commencent à être bien localisées qu'à partir de l'octave 500 Hz, bien qu'encore déportées vers le bas. Les niveaux des sources principales dans les quatre dernières bandes suivent la même tendance que sur la figure 4.19, et les différences concernent plutôt les sources secondaires dans les bandes centrées sur 1, 2 et 4 kHz.

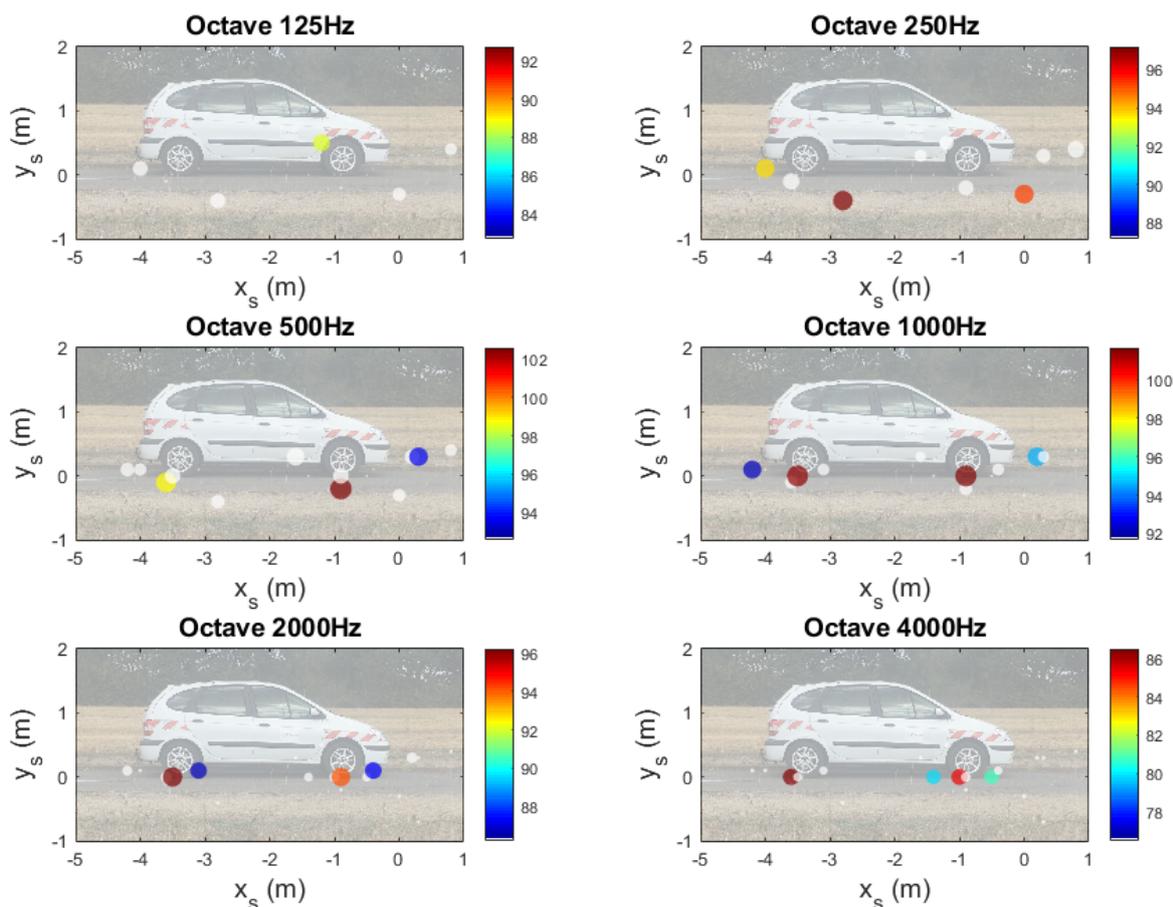


FIGURE A.2 – Cartographie du véhicule au passage obtenue avec CLEAN (filtrage par octaves) avec la sortie de FV comme fonction de localisation. Vitesse 50 km.h^{-1} , sans source B&K. Échelle de couleur : niveau des sources (dB), dynamique : 10 dB.

Évolution de la cartographie résiduelle de CLEANT

Dans la figure B.1, on peut voir l'évolution de la cartographie résiduelle de CLEANT pour chaque bande de fréquence, à chaque itération, pour le passage du véhicule expérimental à 50 km.h⁻¹, la source B&K étant inactive. La figure B.1a donne ainsi la cartographie de formation de voies avec suivi de source classique, étape initiale de l'algorithme. On constate ensuite le retrait progressif des contributions des sources, et la diminution de l'énergie dans chaque bande de fréquence, sur 5 itérations (figure B.1b à B.1f).

Il faut souligner ici que, comme annoncé dans les paramètres des méthodes dans le chapitre 4, la fonction de localisation utilisée pour l'expérience sur véhicule n'est pas la sortie de formation de voies, mais la fonction correspondant au critère de maximum de vraisemblance [Faure 2011]. Ainsi, une source mieux adaptée au modèle de source ponctuelle peut être détectée et retirée de la cartographie avant une source plus étendue, même de niveau supérieur dans la cartographie de FV. Cela explique que l'énergie située au bord de la grille-source dans la bande d'octave 125 Hz reste présente après plusieurs itérations, et également que l'on parvienne à identifier une source au niveau de la roue arrière du véhicule malgré la mauvaise résolution (cf. fig. 4.19 dans le chapitre 4). Dans ce cas précis, la localisation par détection du maximum de FV aurait de façon erronée localisé les sources vers le bas de la grille-source (cf. Annexe A). Cependant, cela peut se révéler aussi préjudiciable, comme dans l'octave 4 kHz, où il reste une source importante vers l'avant du véhicule, mais que l'algorithme ne traite pas en priorité.

En effet, dans ce traitement filtré par bande de fréquence, l'algorithme s'est ici terminé au bout de 5 itérations car le critère énergétique a été atteint dans la première octave. Pour rappel, ce critère consiste à arrêter l'algorithme lorsque l'énergie de la cartographie résiduelle est supérieure à celle de l'itération précédente. Or, il reste de l'énergie et potentiellement d'autres sources à identifier dans d'autres bandes de fréquence, notamment à 4 kHz. De la même manière, il peut arriver que le critère de taux de convergence soit atteint dans une bande et pas les autres, et que l'algorithme s'arrête alors. Il conviendrait de poursuivre la procédure dans les autres bandes de fréquence jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit progressivement atteint dans chacune d'elles.

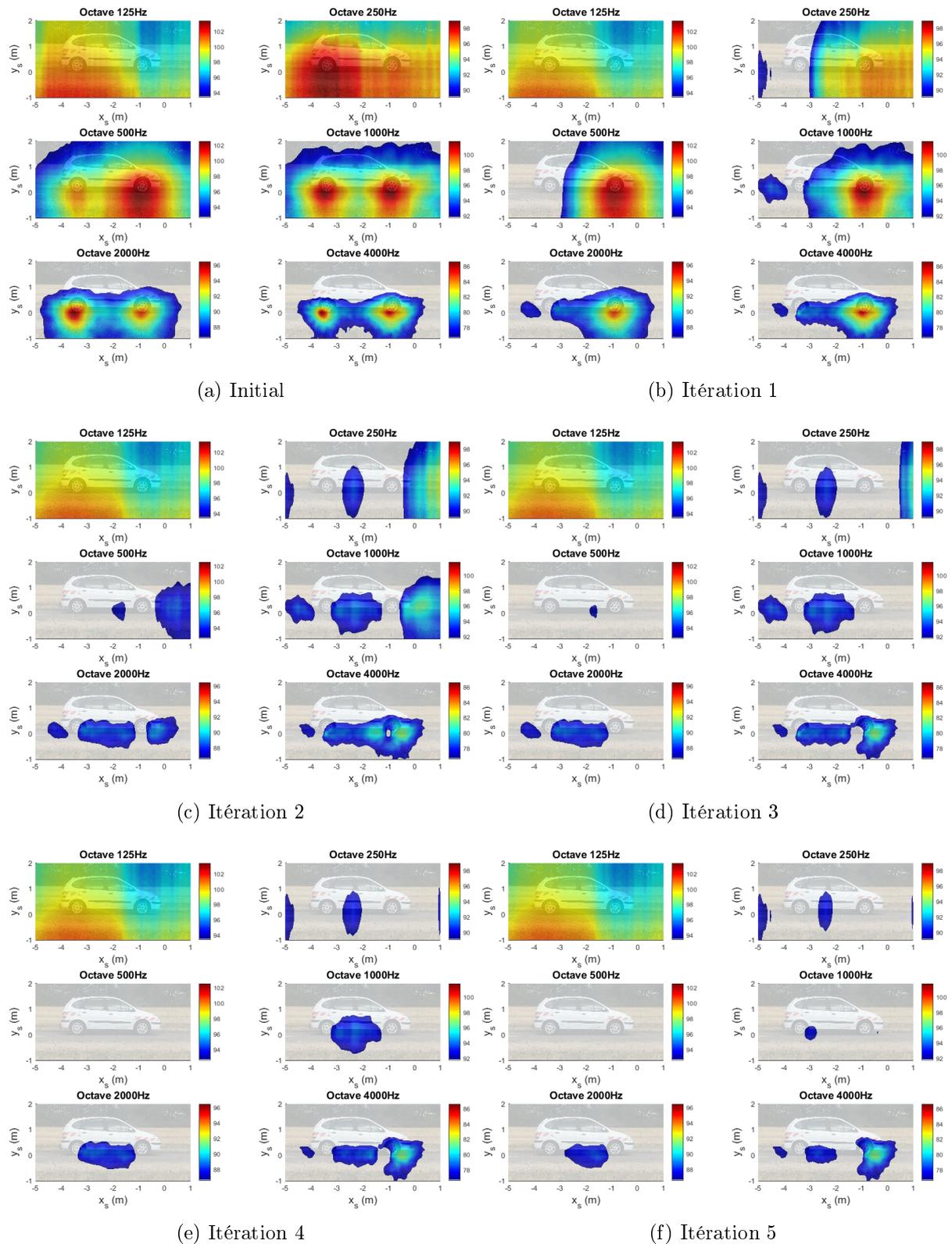


FIGURE B.1 – Cartographies du véhicule au passage obtenue avec CLEAN (filtrage par octave) à chaque itération. Vitesse 50 km.h^{-1} , sans source B&K. Échelle de couleur : niveau des sources (dB), dynamique : 10 dB.

Cartographies cohérentes complémentaires

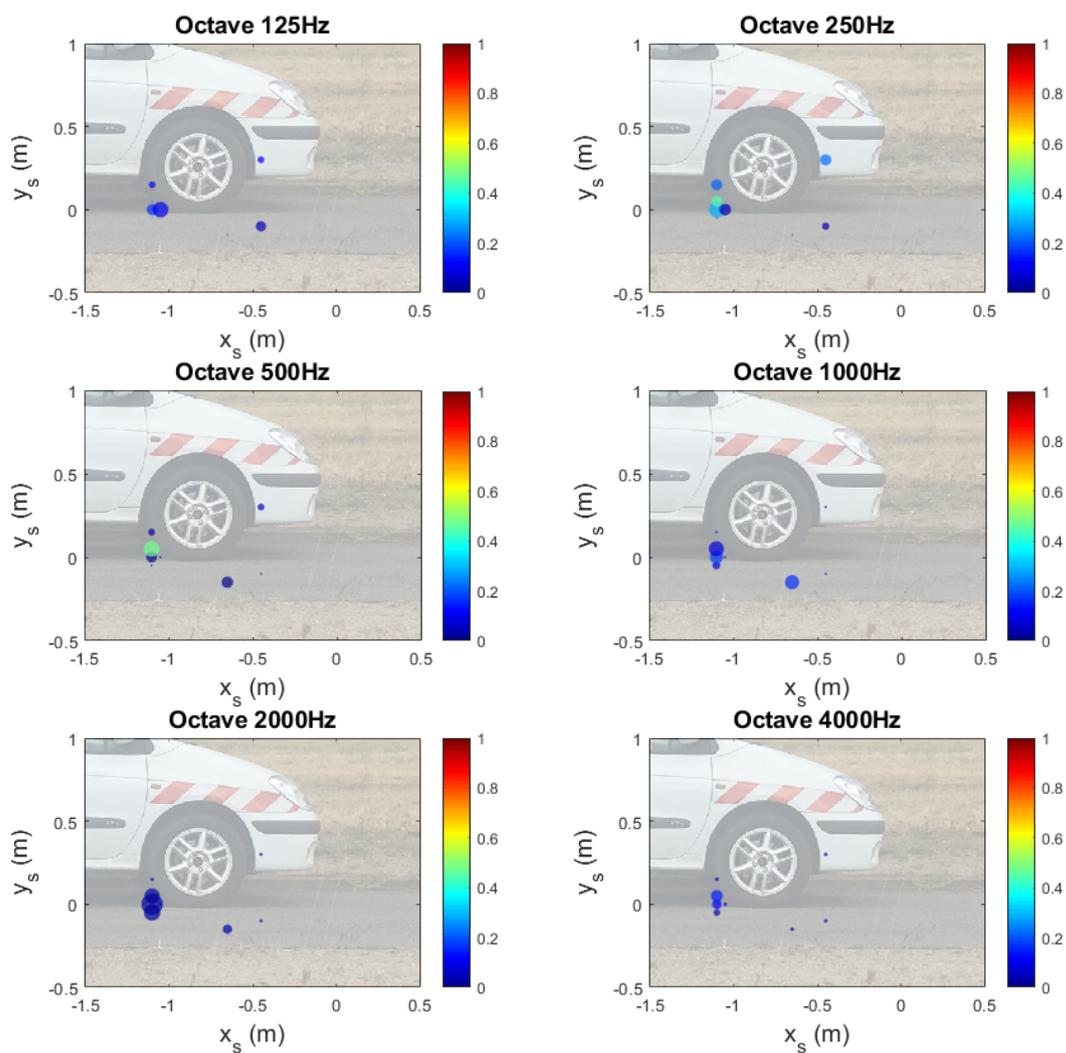


FIGURE C.1 – Cartographie cohérente avec le signal de l'accéléromètre 1 dans le compartiment moteur du véhicule à l'arrêt obtenue avec CLEAN (filtrage par octaves), la source étant contre la roue. Moteur à 2000 $\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$. Signal source sin 2 kHz. Échelle de couleur : puissance cohérente normalisée dans la bande d'octave.

L'accéléromètre 1 est fixé selon l'axe vertical, en position basse du moteur (fig 4.3b). La source identifiée ayant la puissance cohérente normalisée la plus forte vis-à-vis du signal mesuré par ce capteur est située vers l'arrière de la roue et au niveau du sol, dans l'octave centrée sur 500 Hz (fig C.1) ainsi que dans l'octave 250 Hz dans une moindre mesure. Le résultat est notablement différent de la cartographie obtenue en prenant comme référence le signal du microphone situé sous le capot du véhicule (fig 4.23), où la cohérence maximale était atteinte dans la bande 250 Hz pour ce même point-source ainsi que pour un point-source situé plus haut et en avant, à proximité du passage de roue. La puissance cohérente normalisée était quasi-nulle dans l'octave 500 Hz et un peu plus élevée dans l'octave 1 kHz.

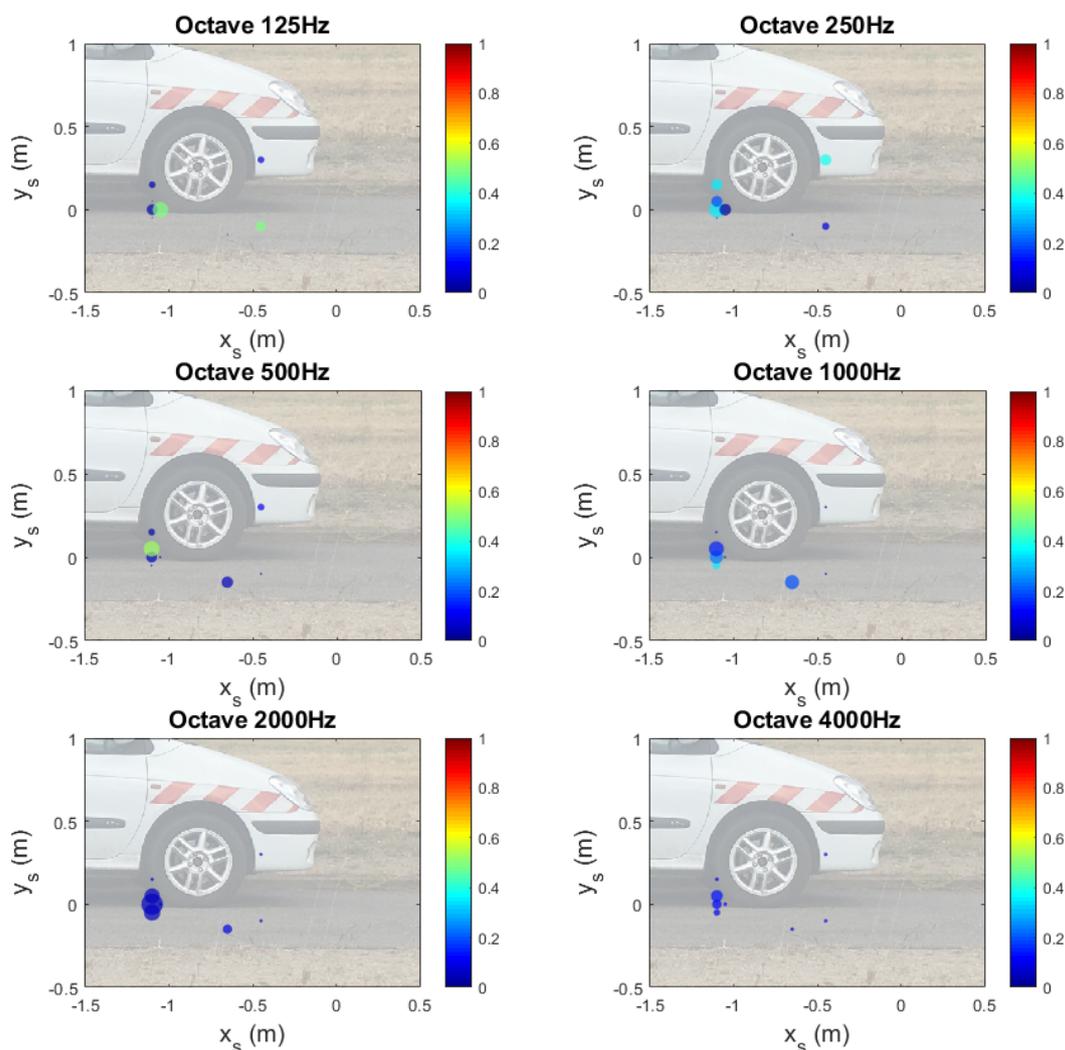


FIGURE C.2 – Cartographie cohérente avec le signal de l'accéléromètre 2 dans le compartiment moteur du véhicule à l'arrêt obtenue avec CLEAN (filtrage par octaves), la source étant contre la roue. Moteur à 2000 $\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$. Signal source sin 2 kHz. Échelle de couleur : puissance cohérente normalisée dans la bande d'octave.

On trouve dans les cartographies cohérentes avec les accéléromètres 2 (fig C.2) et 3 (fig C.3) des résultats également légèrement différents. La puissance cohérente normalisée peut ainsi être maximale dans différentes bandes de fréquence, et correspondre à des contributions différentes.

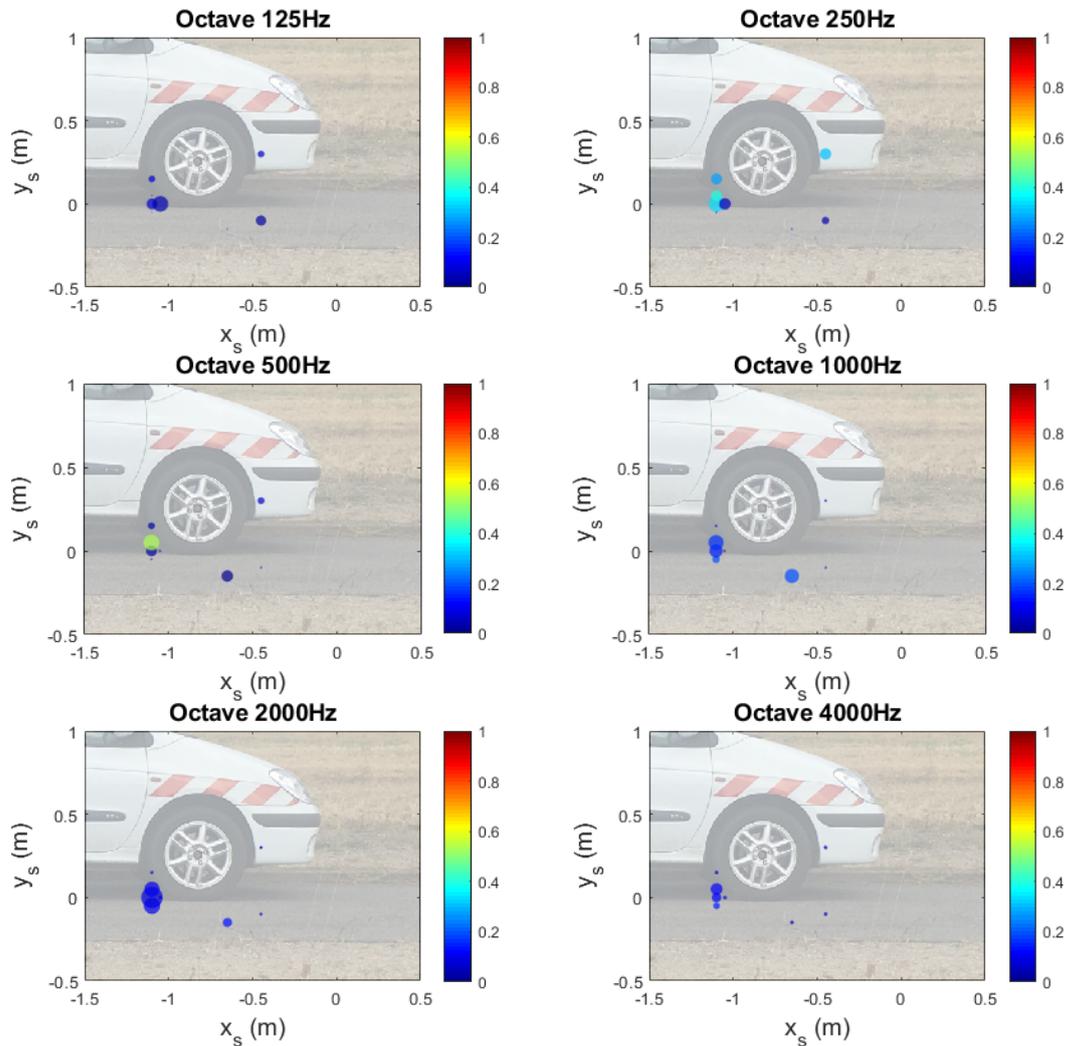


FIGURE C.3 – Cartographie cohérente avec le signal de l'accéléromètre 3 dans le compartiment moteur du véhicule à l'arrêt obtenue avec CLEAN (filtrage par octaves), la source étant contre la roue. Moteur à 2000 $\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$. Signal source sin 2 kHz. Échelle de couleur : puissance cohérente normalisée dans la bande d'octave.

Il ressort de ces cartographies que des informations complémentaires et se superposant sont disponibles avec ces trois capteurs. L'utilisation de cohérences multiples est donc à explorer pour des travaux futurs. De plus, une étude plus approfondie des positions pertinentes pour ces capteurs, ainsi que de leur nombre, serait nécessaire à la bonne interprétation des résultats. En effet, le placement stratégique d'un accéléromètre sur une partie du moteur excitée par un élément clairement identifié (par exemple les explosions du mélange air-carburant dans les

pistons) pourrait permettre d'identifier la contribution de cet élément particulier sur la source acoustique localisée à l'extérieur du véhicule. Il est cependant prématuré d'interpréter en ces termes les résultats obtenus ici, faute d'une étude exhaustive de ce type.

Réponses d'antenne

Dans cette annexe se trouvent les réponses d'antenne théoriques de l'antenne utilisée pour les mesures présentées au chapitre 4, aux fréquences centrales des bandes d'octave d'affichage des résultats. Elles correspondent à une source située en face du centre de l'antenne. Il convient de noter que lors des mesures, les sources principales du véhicule, situées au niveau des passages de roue ou bien au niveau du toit pour la source B&K, ne sont pas à la hauteur du centre de l'antenne, ce qui résulte en des réponses légèrement déformées par rapport aux réponses présentées ici.

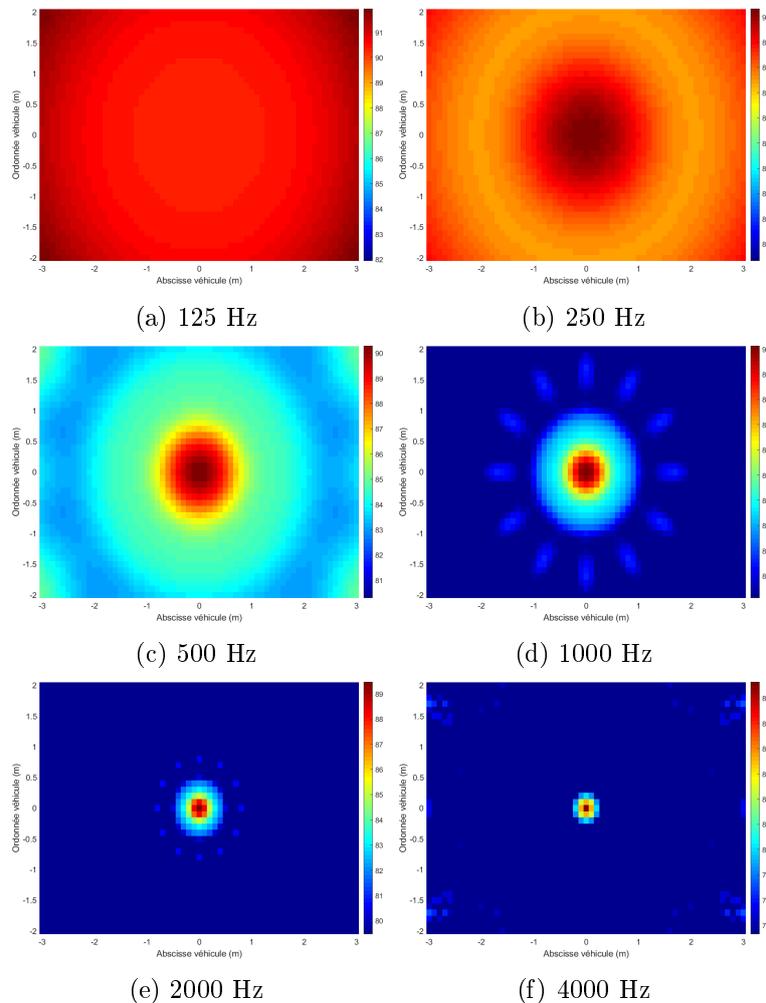


FIGURE D.1 – Réponses d'antenne aux fréquences centrales des bandes d'octave.

Bibliographie

- [Anfosso-Lédée et Cesbron 2013] ANFOSSO-LÉDÉE, Fabienne ; CESBRON, Julien : Bruit de roulement automobile : influence du revêtement de chaussée. Dans : *Techniques de l'ingénieur* (2013), Avril, Num. ref. article : br2060 (Cité en page 11.)
- [Bai et al. 2010] BAI, Mingsian R. ; LIN, Jia-Hong ; LIU, Kwan-Liang : Optimized microphone deployment for near-field acoustic holography : To be, or not to be random, that is the question. Dans : *Journal of Sound and Vibration* 329 (2010), Juillet, Num. 14, p. 2809–2824 (Cité en page 24.)
- [Ballesteros et al. 2015] BALLESTEROS, José A. ; SARRADJ, Ennes ; FERNÁNDEZ, Marcos D. ; GEYER, Thomas ; BALLESTEROS, M^a J. : Noise source identification with Beamforming in the pass-by of a car. Dans : *Applied Acoustics* 93 (2015), Juin, p. 106–119 (Cité en page 13.)
- [Baron et al. 2018] BARON, Valentin ; FINEZ, Arthur ; NICOLAS, Barbara : Numerical and experimental assessment of functional beamforming for source quantification. Dans : *BeBeC-2018-S6*, 2018, p. 15 (Cité en page 14.)
- [Barsikow 1996] BARSIKOW, B. : Experiences with various configurations of microphone arrays used to locate sound sources on railway trains operated by the DB AG. Dans : *Journal of Sound and Vibration* 193 (1996), Num. 1, p. 283–293 (Cité en page 13.)
- [Bendat 1976] BENDAT, J.S. : Solutions for the multiple input/output problem. Dans : *Journal of Sound and Vibration* 44 (1976), Février, p. 311–325 (Cité en page 53.)
- [Bendat et Piersol 1971] BENDAT, Julius S. ; PIERSOL, Allan G. : *Random data : analysis and measurement procedures*. New York : Wiley-Interscience, 1971. – ISBN 978-0-471-06470-1 (Cité en page 48.)
- [Bendat 1980] BENDAT, Julius S. : *Engineering applications of correlation and spectral analysis*. New York : Wiley, 1980. – ISBN 978-0-471-05887-8 (Cité en pages 48, 49, 50, 51, 52 et 53.)
- [Böhning et Siller 2007] BÖHNING, Peer ; SILLER, Henri : Study of a Deconvolution Algorithm for Aircraft Flyover Measurements. Dans : *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007, p. 1–8 (Cité en page 40.)
- [Bienvenu et Kopp 1983] BIENVENU, Georges ; KOPP, Laurent : Optimality of High Resolution Array Processing Using the Eigensystem Approach. Dans : *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing* 31 (1983), Num. 5, p. 1235–1248 (Cité en page 14.)
- [Blacodon et Elias 2003] BLACODON, Daniel ; ELIAS, Georges : Level Estimation of Extended Acoustic Sources Using an Array of Microphones. Dans : *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003, p. 918–928 (Cité en page 15.)

- [Boone 1987] BOONE, Marinus M. : *Design and development of a synthetic acoustic antenna for highly directionally sound measurements*, Delft University of Technology, Thèse de Doctorat, 1987 (Cité en page 29.)
- [Braun et al. 2013] BRAUN, M.E. ; WALSH, S.J. ; HORNER, J.L. ; CHUTER, R. : Noise source characteristics in the ISO 362 vehicle pass-by noise test : Literature review. Dans : *Applied Acoustics* 74 (2013), Novembre, Num. 11, p. 1241–1265 (Cité en pages 6 et 8.)
- [Brooks et Humphreys 2004] BROOKS, Thomas ; HUMPHREYS, William : A Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources (DAMAS) Determined from Phased Microphone Arrays. Dans : *American Institute of Aeronautics and Astronautics*. Manchester, UK : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004, p. 18. – ISBN 978-1-62410-071-0 (Cité en pages 15, 26 et 27.)
- [Brooks et Humphreys 2006] BROOKS, Thomas F. ; HUMPHREYS, William M. : A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays. Dans : *Journal of Sound and Vibration* 294 (2006), Juillet, Num. 4–5, p. 856–879 (Cité en page 26.)
- [Brusniak et al. 2006] BRUSNIAK, Leon ; UNDERBRINK, James ; STOKER, Robert : Acoustic Imaging of Aircraft Noise Sources Using Large Aperture Phased Arrays. Dans : *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006, p. 20. – ISBN 978-1-62410-021-5 (Cité en pages 13 et 40.)
- [Camargo 2010] CAMARGO, Hugo E. : *A Frequency Domain Beamforming Method to Locate Moving Sound Sources*. Blacksburg, VA, USA, Virginia Polytechnic Institute and State University, Thèse de Doctorat, 2010 (Cité en page 46.)
- [Camier et al. 2012] CAMIER, Cedric ; BLAIS, Jean-Francois ; LAPOINTE, Robby ; BERRY, Alain : A time-domain analysis of 3D non-uniform moving acoustic sources : application to source identification and absolute quantification via beamforming. Dans : *BeBeC-2012-30*, 2012, p. 16 (Cité en page 35.)
- [Capon 1969] CAPON, J. : High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. Dans : *Proceedings of the IEEE* 57 (1969), Num. 8, p. 1408–1418 (Cité en page 14.)
- [Cardenas Cabada et al. 2017] CARDENAS CABADA, Edouard ; LECLÈRE, Quentin ; ANTONI, Jérôme ; HAMZAOU, Nasser : Fault detection in rotating machines with beamforming : Spatial visualization of diagnosis features. Dans : *Mechanical Systems and Signal Processing* 97 (2017), p. 33–43 (Cité en page 65.)
- [Chatagnon et Pallas 2014] CHATAGNON, Roger ; PALLAS, Marie-Agnès : Emissions sonores de 12 véhicules légers à motorisation thermique. Décomposition en bruit de moteur/bruit de roulement / IFSTTAR, AME, LAE. 2014 (LAE 1403). – Rapport d’expertise. – 62 p (Cité en page 6.)

- [Conte 2008] CONTE, Frédéric : *Modélisation CFD du phénomène acoustique de pompage d'air dans un contact pneumatique/chaussée*. Lyon, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Thèse de Doctorat, 2008 (Cité en pages 10 et 11.)
- [Cousson et al. 2017] COUSSON, Rémi ; PALLAS, Marie-Agnès ; LECLÈRE, Quentin ; BÉRENGIER, Michel : Identification of acoustic moving sources in the context of a road vehicle at pass-by. Dans : *Proceedings of Meetings on Acoustics* Vol. 30, 2017, p. 040012 (Cité en page 48.)
- [Döbler et Schröder 2012] DÖBLER, Dirk ; SCHRÖDER, Dr R. : Contrast improvement and sound reconstruction of quiet sound sources using a high dynamic range algorithm. Dans : *BeBeC-2012-14*, 2012, p. 11 (Cité en page 62.)
- [Döbler et Schröder 2010] DÖBLER, Dirk ; SCHRÖDER, Ralf : Contrast improvement of acoustic maps by successive deletion of the main sources. Dans : *BeBeC-2010-19*, 2010, p. 6 (Cité en page 62.)
- [Döbler et al. 2010] DÖBLER, Dirk ; SCHRÖDER, Ralf ; HEILMANN, Gunnar : Successive deletion of main sources in acoustic maps working in the time domain. Dans : *Internoise 2010*, 2010, p. 8 (Cité en page 62.)
- [Dougherty 2004] DOUGHERTY, Robert : Advanced Time-Domain Beamforming Techniques. Dans : *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Mai 2004, p. 11. – ISBN 978-1-62410-071-0 (Cité en page 14.)
- [Dougherty et Stoker 1998] DOUGHERTY, Robert ; STOKER, Robert : Sidelobe suppression for phased array aeroacoustic measurements. Dans : *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998, p. 11 (Cité en page 29.)
- [Dougherty 2002] DOUGHERTY, Robert P. : Beamforming In Acoustic Testing. Dans : *Aeroacoustic Measurements*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002 (Experimental Fluid Mechanics), p. 62–97. – ISBN 978-3-642-07514-8 978-3-662-05058-3 (Cité en page 14.)
- [Dougherty 2005] DOUGHERTY, Robert P. : Extensions of DAMAS and Benefits and Limitations of Deconvolution in Beamforming. Dans : *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2005, p. 13 (Cité en pages 26, 28 et 40.)
- [Dougherty 2014] DOUGHERTY, Robert P. : Functional beamforming. Dans : *BeBeC-2014-1*, 2014, p. 25 (Cité en page 14.)
- [Dubois 2012] DUBOIS, Guillaume : *A multi-asperity approach for dynamic tyre/road contact model : application to tyre/road noise*, Ecole Centrale de Nantes (ECN), Thèse de doctorat, Septembre 2012 (Cité en pages 10, 11 et 12.)
- [Ehrenfried et Koop 2007] EHRENFRIED, Klaus ; KOOP, Lars : Comparison of Iterative Deconvolution Algorithms for the Mapping of Acoustic Sources. Dans : *AIAA Journal* 45 (2007), Juillet, Num. 7, p. 1584–1595 (Cité en pages 28 et 31.)

- [Elias 1990] ELIAS, Georges : Localisation par antenne focalisée des sources de bruit en vue de leur réduction. Dans : *Science et Défense 1990, 1990* (Cité en page 20.)
- [Elias et Malarney 1983] ELIAS, Georges ; MALARNEY, Christian : Utilisation d'antennes focalisées pour la localisation des sources acoustiques. Dans : *11ème ICA, 1983* (Cité en pages 16 et 22.)
- [Faure 2011] FAURE, Baldrik : *Caractérisation du rayonnement acoustique d'un rail à l'aide d'un réseau de microphones*, Université de Grenoble, phdthesis, Septembre 2011 (Cité en pages 63, 110 et 151.)
- [Fleury et Bulté 2011] FLEURY, Vincent ; BULTÉ, Jean : Extension of deconvolution algorithms for the mapping of moving acoustic sources. Dans : *The Journal of the Acoustical Society of America* 129 (2011), Mars, Num. 3, p. 1417–1428 (Cité en pages 41, 42, 44 et 61.)
- [Garcia-Pedroche et Bennett 2011] GARCIA-PEDROCHE, Miguel ; BENNETT, Gareth : Aeroacoustic Noise Source Identification Using Irregularly Sampled LDV Measurements Coupled with Beamforming. Dans : *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Juin 2011, p. 9. – ISBN 978-1-60086-943-3 (Cité en page 56.)
- [Geng et al. 2015] GENG, Lin ; LECLERE, Quentin ; PEREIRA, Antonio ; Bi, Chuan X. : Identification of rotating sound source based on microphone array measurements. Dans : *S18d Problèmes inverses et imagerie acoustique* (2015) (Cité en page 60.)
- [Gerstoft et Hodgkiss 2011] GERSTOFT, Peter ; HODGKISS, William S. : Improving beampatterns of two-dimensional random arrays using convex optimization. Dans : *The Journal of the Acoustical Society of America* 129 (2011), Avril, p. EL135–EL140 (Cité en page 24.)
- [Gill et al. 2011] GILL, P. R. ; WANG, A. ; MOLNAR, A. : The In-Crowd Algorithm for Fast Basis Pursuit Denoising. Dans : *IEEE Transactions on Signal Processing* 59 (2011), Octobre, Num. 10, p. 4595–4605 (Cité en page 14.)
- [Graham 2018] GRAHAM, W. R. : Interpolation for de-Dopplerisation. Dans : *Journal of Sound and Vibration* 422 (2018), Mai, p. 210–236 (Cité en page 38.)
- [Guidati 2009] GUIDATI, Sandro : Source Localisation with Beamforming in Vehicle Acoustics. Dans : *NAG/DAGA Vol. 2009, 2009*, p. 4 (Cité en pages 56 et 98.)
- [Guidati et Sottek 2008] GUIDATI, Sandro ; SOTTEK, Roland : Visualisation of sound sources in real time : Microphone array processing beyond the state of the art. Dans : *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* Vol. 2008, Institute of Noise Control Engineering, 2008, p. 926–937 (Cité en pages 56, 70 et 98.)
- [Guérin et Weckmüller 2008] GUÉRIN, Sébastien ; WECKMÜLLER, Christian : Frequency-domain reconstruction of the point-spread function for moving sources. Dans : *BeBeC-2008-14*, 2008, p. 12 (Cité en pages 39, 40 et 47.)

- [Harrison 2004] HARRISON, Matthew : *Vehicle refinement : controlling noise and vibration in road vehicles*. Oxford ; Burlington, Mass. : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. – ISBN 978-0-7506-6129-4 978-0-08-047475-5 (Cité en page 6.)
- [Högbom 1974] HÖGBOM, J. A. : Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines. Dans : *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* 15 (1974), Juin, p. 417 (Cité en pages 14, 26 et 29.)
- [Ibarra Zárate 2013] IBARRA ZÁRATE, David I. : *Contribution of the noise radiated by a single vehicle to the road traffic noise*, E.T.S.I. Industriales (UPM), phd, 2013 (Cité en page 6.)
- [ISO 362-1 :2015 2015] ISO 362-1 :2015 : *Mesurage du bruit émis par les véhicules routiers en accélération – Méthode d’expertise – Partie 1 : Catégories M et N*. AF-NOR. Janvier 2015 (Cité en page 1.)
- [Iwao 1996] IWAO, K : A study on the mechanism of tire/road noise. Dans : *JSAE Review* 17 (1996), Avril, Num. 2, p. 139–144 (Cité en page 10.)
- [Jaeckel 2006] JAECKEL, Olaf : Strengths and weaknesses of calculating beamforming in the time domain. Dans : *BeBeC-2006-2*, 2006, p. 10 (Cité en page 25.)
- [Johnson et Dudgeon 1993] JOHNSON, Don H. ; DUDGEON, Dan E. : *Array signal processing : concepts and techniques*. Upper Saddle River (N.J.), Etats-Unis d’Amérique : Prentice Hall, 1993. – ISBN 978-0-13-048513-7 (Cité en pages 20 et 25.)
- [de Jong et al. 2009] JONG, C. A. F. de ; BOSSCHERS, J. ; HASENPFLUG, H. : Model Scale Measurements of Surface Ship Radiated Flow Noise. Dans : *NAG/DAGA*, 2009, p. 5 (Cité en page 13.)
- [Kern et Opfer 2006] KERN, Marcus ; OPFER, Holger : Berlin Beamforming Conference. Dans : *BeBeC-2006-16*, 2006, p. 6 (Cité en page 14.)
- [Kim et al. 2017] KIM, Ba-Leum ; JUNG, Jin-Young ; OH, Il-Kwon : Modified transfer path analysis considering transmissibility functions for accurate estimation of vibration source. Dans : *Journal of Sound and Vibration* 398 (2017), Juin, p. 70–83 (Cité en page 15.)
- [Kim et al. 2012] KIM, Koo-Hwan ; CHOI, Jung-Woo ; KIM, Yang-Hann : Partial Source Decomposition for Beamforming in Multiple Incoherent Sources. Dans : *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* Vol. 2012, Institute of Noise Control Engineering, 2012, p. 3579–3591 (Cité en page 57.)
- [Kook et al. 2000] KOOK, H. ; MOEBS, G. B. ; DAVIES, P. ; BOLTON, J. S. : An efficient procedure for visualizing the sound field radiated by vehicles during standardized passby tests. Dans : *Journal of Sound and Vibration* 233 (2000), Mai, Num. 1, p. 137–156 (Cité en page 13.)
- [Lamotte et al. 2016] LAMOTTE, L. ; NICOLAS, B. ; PHAM, M. Q. ; OUDOMPHENG, B. : A theoretical and experimental comparison of the deconvolution methods for moving sources. Dans : *Berlin Beamforming Conference (Bebec)*, 2016, p. 11 (Cité en page 41.)

- [Lamotte et al. 2012] LAMOTTE, Lucille ; PAILLASSEUR, Sébastien ; JANSSENS, Karl ; LANSLOTS, Jeroen : Enhancing Sound Source Localization with Noise Separation Methods. Dans : *Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference*, 2012, p. 8 (Cité en page 56.)
- [Lawson et Hanson 1995] LAWSON, C. ; HANSON, R. : *Solving Least Squares Problems*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Janvier 1995 (Classics in Applied Mathematics). – ISBN 978-0-89871-356-5 (Cité en pages 15, 26 et 27.)
- [Le Courtois et al. 2010] LE COURTOIS, Florent ; PASCAL, Jean-Claude ; THOMAS, Jean-Hugh ; POISSON, Franck : Optimisation par algorithme génétique de la géométrie d’antenne pour la localisation de sources. Dans : *10ème Congrès Français d’Acoustique*, 2010, p. 6 (Cité en page 24.)
- [Le Courtois et al. 2016] LE COURTOIS, Florent ; THOMAS, Jean-Hugh ; POISSON, Franck ; PASCAL, Jean-Claude : Genetic optimisation of a plane array geometry for beamforming. Application to source localisation in a high speed train. Dans : *Journal of Sound and Vibration* 371 (2016), Juin, p. 78–93 (Cité en pages 13 et 24.)
- [Leclere 2012] LECLERE, Quentin : *Caractérisation expérimentale de sources vibratoires et acoustiques*, Université Claude Bernard - Lyon I, Habilitation à diriger des recherches, Décembre 2012 (Cité en pages 53 et 54.)
- [Leclere et al. 2016] LECLERE, Quentin ; PEREIRA, Antonio ; BAILLY, Christophe ; ANTONI, Jerome ; PICARD, Christophe : A unified formalism for acoustic imaging techniques : illustrations in the frame of a didactic numerical benchmark. Dans : *BeBeC-2016-D5*, 2016, p. 17 (Cité en pages 14 et 33.)
- [Leclère et al. 2005a] LECLÈRE, Q. ; PEZERAT, C. ; LAULAGNET, B. ; POLAC, L. : Indirect measurement of main bearing loads in an operating diesel engine. Dans : *Journal of Sound and Vibration* 286 (2005), Août, p. 341–361 (Cité en page 53.)
- [Leclère et al. 2005b] LECLÈRE, Q. ; PÉZERAT, C. ; LAULAGNET, B. ; POLAC, L. : Application of multi-channel spectral analysis to identify the source of a noise amplitude modulation in a diesel engine operating at idle. Dans : *Applied Acoustics* 66 (2005), Juillet, p. 779–798 (Cité en pages 53, 54 et 55.)
- [Leclère et al. 2006] LECLÈRE, Quentin ; POLAC, Laurent ; LAULAGNET, Bernard ; GUYADER, Jean-Louis : Vibro-acoustique des moteurs d’automobile. Dans : *Techniques de l’ingénieur Acoustique des transports* base documentaire : TIB523DUO. (2006), Num. ref. article : bm2773 (Cité en pages 7 et 8.)
- [Leiba et al. 2016] LEIBA, Raphaël ; OLLIVIER, François ; MARCHIANO, Régis ; MISDARIIS, Nicolas ; MARCHAL, Jacques : Urban acoustic imaging : from measurement to the soundscape perception evaluation. Dans : *Internoise 2016*, 2016, p. 8 (Cité en page 65.)
- [Li et Stoica 1996] LI, Jian ; STOICA, Petre : Efficient Mixed-Spectrum Estimation with Applications to Target Feature Extraction. Dans : *IEEE Transactions on Signal Processing* 44 (1996), Num. 2, p. 15 (Cité en page 30.)

- [Li et al. 1997] LI, Jian ; ZHENG, Dunmin ; STOICA, P. : Angle and waveform estimation via RELAX. Dans : *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 33 (1997), Juillet, Num. 3, p. 1077–1087 (Cité en page 14.)
- [Lyon 2011] LYON, Grand : Plan Environnement sonore du Grand Lyon. (2011), p. 50 (Cité en page 2.)
- [Meng et al. 2018] MENG, Fanyu ; BEHLER, Gottfried ; VORLÄNDER, Michael : A Synthesis Model for a Moving Sound Source Based on Beamforming. Dans : *Acta Acustica united with Acustica* 104 (2018), Mars, p. 351–362 (Cité en page 65.)
- [Merino-Martinez et al. 2016] MERINO-MARTINEZ, Roberto ; SNELLEN, Mirjam ; SIMONS, Dick G. : Functional beamforming applied to full scale landing aircraft. Dans : *BeBeC-2016-D16*, 2016, p. 14 (Cité en page 14.)
- [Michel et al. 2004] MICHEL, U ; BARSIKOW, B ; BÖHNING, P ; HELLMIG, M : Localisation of sound sources on moving vehicles with phased microphone arrays. Dans : *Internoise 2004*, 2004, p. 7 (Cité en page 13.)
- [Michel 2006] MICHEL, Ulf : History of acoustic beamforming. Dans : *BeBeC-2006-1*, 2006, p. 17 (Cité en page 13.)
- [Michel et Funke 2008] MICHEL, Ulf ; FUNKE, Stefan : Inverse method for the acoustic source analysis of an aeroengine. Dans : *BeBeC-2008-13*, 2008, p. 13 (Cité en page 15.)
- [Morse et Ingard 1992] MORSE, Philip M. ; INGARD, K. U. : *Theoretical Acoustics*. Princeton, N.J : Princeton University Press, Juillet 1992. – ISBN 978-0-691-02401-1 (Cité en pages 34, 35 et 36.)
- [Mueller 2002] MUELLER, Thomas J. (Ed.) : *Aeroacoustic Measurements*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2002 (Experimental Fluid Mechanics). – ISBN 978-3-540-41757-6 (Cité en page 13.)
- [Oudompheng 2015] OUDOMPHEUNG, Benoit : *Localisation et contribution de sources acoustiques de navire au passage par traitement d'antenne réduite*, Université Grenoble Alpes, Thèse de doctorat, Novembre 2015 (Cité en pages 13, 41 et 61.)
- [Pallas et Perrier 2009] PALLAS, M A. ; PERRIER, R : Nearfield noise source localisation with constant directivity arrays : a comparison - Application to tram noise. Dans : *NAG/DAGA*, 2009, p. 4 (Cité en page 24.)
- [Pallas et al. 2014a] PALLAS, M.A. ; CHATAGNON, R. ; LELONG, J. : Noise emission assessment of a hybrid electric mid-size truck. Dans : *Applied Acoustics* 76 (2014), Février, p. 280–290 (Cité en page 2.)
- [Pallas et al. 2011] PALLAS, M.A. ; LELONG, J. ; CHATAGNON, R. : Characterisation of tram noise emission and contribution of the noise sources. Dans : *Applied Acoustics* 72 (2011), Juin, Num. 7, p. 437–450 (Cité en page 13.)

- [Pallas 2002] PALLAS, Marie-Agnès : Localisation des sources de bruit des transports guidés. Dans : *Instrumentation Mesure Métrologie (I2M)* 2 (2002), Num. 1-2/2002, p. 29 (Cité en pages 13 et 37.)
- [Pallas et al. 2014b] PALLAS, Marie-Agnès ; BÉRENGIER, Michel ; MUIRHEAD, Matthew ; MORGAN, Phil : How to consider Electric and Hybrid Electric vehicles in CNOSSOS-EU predicting method? Dans : *Forum Acusticum*, 2014, p. 6 (Cité en page 3.)
- [Pallas et al. 2014c] PALLAS, Marie-Agnès ; CHATAGNON, Roger ; BÉRENGIER, Michel ; MUIRHEAD, Matthew : Projet FOREVER : Emission sonore des véhicules légers électriques et hybrides. Dans : *Congrès Français d'Acoustique (CFA)*, 2014 (Cité en page 3.)
- [Pallas et al. 2013] PALLAS, Marie-Agnès ; CHATAGNON, Roger ; LELONG, Joël : Noise emission and noise sources of a hybrid bus. Dans : *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* Vol. 247, Institute of Noise Control Engineering, 2013, p. 3482–3491 (Cité en page 13.)
- [Parisot-Dupuis 2012] PARISOT-DUPUIS, Hélène : *Application de l'holographie acoustique en soufflerie par mesures LDV*. Toulouse, France, Université de Toulouse, Thèse de Doctorat, 2012 (Cité en page 13.)
- [Pascal 2009] PASCAL, Jean-Claude : Formation de voies : détermination du vecteur de pointage. Dans : *Cours ENSIM 3ème année* (2009) (Cité en page 19.)
- [Price et Bernhard 1986] PRICE, S. M. ; BERNHARD, R. J. : Virtual coherence : a digital signal processing technique for incoherent source identification. Dans : *4th International Modal Analysis Conference*, 1986, p. 8 (Cité en page 53.)
- [Publications Office of the European Union 2002] PUBLICATIONS OFFICE OF THE EUROPEAN UNION : Directive 2002/49/CE du Parlement européen et du Conseil du 25 juin 2002 relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement. Dans : *Journal officiel des Communautés européennes* L 189 (2002), Juin (Cité en page 1.)
- [Règlement (CE) 661/2009 2009] RÈGLEMENT (CE) 661/2009 : Règlement (CE) no 661/2009 du Parlement européen et du Conseil du 13 juillet 2009 concernant les prescriptions pour l'homologation relatives à la sécurité générale des véhicules à moteur, de leurs remorques et des systèmes, composants et entités techniques distinctes qui leur sont destinés. Dans : *Journal officiel de l'Union européenne* L 200 (2009), p. 24 (Cité en page 1.)
- [Roozen et Leclère 2013] ROOZEN, N.B. ; LECLÈRE, Q. : On the use of artificial excitation in operational transfer path analysis. Dans : *Applied Acoustics* 74 (2013), Octobre, Num. 10, p. 1167–1174 (Cité en page 15.)
- [Sandberg et Ejsmont 2002] SANDBERG, Ulf ; EJSMONT, Jerzy A. : *Tyre/road Noise Reference Book*. Informex, 2002. – ISBN 978-91-631-2610-9 (Cité en pages 10 et 11.)
- [Schuhmacher et al. 2012] SCHUHMACHER, A ; SHIRAHASHI, Y ; HIRAYAMA, M ; RYU, Y : Indoor pass-by noise contribution analysis using source path contribution concept. Dans : *ISMA 2012*, 2012, p. 12 (Cité en page 15.)

- [Sijtsma 2007] SIJTSMA, Pieter : CLEAN Based on Spatial Source Coherence. Dans : *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Mai 2007, p. 23. – ISBN 978-1-62410-003-1 (Cité en pages 26, 29, 30 et 57.)
- [Sijtsma et al. 2017] SIJTSMA, Pieter ; MERINO MARTINEZ, Roberto ; MALGOEZAR, Anwar ; SNELLEN, Mirjam : High-Resolution CLEAN-SC : Theory and Experimental Validation. Dans : *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Juin 2017, p. 21. – ISBN 978-1-62410-504-3 (Cité en page 30.)
- [Sijtsma et al. 2001] SIJTSMA, Pieter ; OERLEMANS, Stefan ; HOLTHUSEN, Hermann : Location of rotating sources by phased array measurements. Dans : *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2001, p. 13 (Cité en page 60.)
- [Sijtsma et Stoker 2004] SIJTSMA, Pieter ; STOKER, Robert : Determination of Absolute Contributions of Aircraft Noise Components Using Fly-over Array Measurements. Dans : *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Mai 2004, p. 14. – ISBN 978-1-62410-071-0 (Cité en page 13.)
- [Siller 2012] SILLER, Henri A. : Localisation of Sound Sources on Aircraft in Flight. Dans : *BeBeC-2012-1*, Août 2012, p. 193 (Cité en page 40.)
- [Tibshirani 1996] TIBSHIRANI, Robert : Regression Shrinkage and Selection via the Lasso. Dans : *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 58 (1996), Num. 1, p. 267–288 (Cité en page 14.)
- [Tikhonov et Arsenine 1976] TIKHONOV, Andrei ; ARSENINE, Vasilij : *Méthodes de résolution de problèmes mal pos s*. Editions de Moscou. Editions de Moscou, 1976 (Cité en page 14.)
- [del Val et al. 2012] VAL, Lara del ; JIMÉNEZ, María ; IZQUIERDO, Alberto ; VILLACORTA, Juan : Optimisation of sensor positions in random linear arrays based on statistical relations between geometry and performance. Dans : *Applied Acoustics* 73 (2012), Janvier, p. 78–82 (Cité en page 24.)
- [Veronesi et Maynard 1989] VERONESI, W. A. ; MAYNARD, J. D. : Digital holographic reconstruction of sources with arbitrarily shaped surfaces. Dans : *The Journal of the Acoustical Society of America* 85 (1989), Num. 2, p. 588–598 (Cité en page 12.)
- [Wang et Crocker 1983] WANG, M. E. ; CROCKER, Malcolm J. : On the application of coherence techniques for source identification in a multiple noise source environment. Dans : *The Journal of the Acoustical Society of America* 74 (1983), Septembre, p. 861–872 (Cité en page 54.)
- [Wang 2010] WANG, Xu (Ed.) : *Vehicle noise and vibration refinement*. Boca Raton, Fla. : CRC Press [u.a.], 2010 (Woodhead publishing in mechanical engineering). – ISBN 978-1-84569-497-5 978-1-4398-3133-5 978-1-84569-804-1 (Cité en page 6.)
- [Wang et al. 2003] WANG, Yanwei ; LI, Jian ; STOICA, Petre ; SHEPLAK, Mark ; NISHIDA, Toshikazu : Wideband RELAX and Wideband CLEAN for Aeroacoustic Imaging. Dans :

American Institute of Aeronautics and Astronautics, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Mai 2003, p. 11. – ISBN 978-1-62410-102-1 (Cité en pages 14 et 30.)

[Williams et al. 1980] WILLIAMS, Earl G. ; MAYNARD, J. D. ; SKUDRZYK, Eugen : Sound source reconstructions using a microphone array. Dans : *The Journal of the Acoustical Society of America* 68 (1980), Juillet, Num. 1, p. 340–344 (Cité en page 12.)

[Zhekova 2007] ZHEKOVA, Irina : *Analyse temps-fréquence et synthèse granulaire des bruits moteur diesel au ralenti : Application pour étude perceptive dans le contexte des scènes auditives.*, Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II, Thèse de doctorat, Octobre 2007 (Cité en pages 6, 7, 8 et 9.)



FOLIO ADMINISTRATIF

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON OPEREE AU SEIN DE L'INSA LYON

NOM : COUSSON

DATE de SOUTENANCE : 14/12/2018

Prénoms : Rémi

TITRE : Identification de sources acoustiques au passage d'un véhicule routier par imagerie acoustique parcimonieuse dans le domaine temporel

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : AAAALYSEIXXXX

Ecole doctorale : Mécanique – Energétique – Génie civil – Acoustique (MEGA)

Spécialité : Acoustique

RESUME : Le présent travail de recherche s'inscrit dans le cadre de la caractérisation de l'émission de bruit des véhicules routiers. On désire identifier les sources de bruit d'un véhicule en mouvement, lors de son passage sur une voie de circulation en conditions réelles, à partir de mesures acoustiques effectuées à poste fixe en bord de voies. Les méthodes d'imagerie acoustique utilisées actuellement présentent des performances insuffisantes sur véhicules routiers.

Un état de l'art a permis d'identifier une méthode existante, MSA-PSF, consistant à effectuer sous certaines hypothèses une déconvolution de sources mobiles dans le domaine fréquentiel, et originellement utilisée en aéroacoustique. Cette méthode est ici adaptée au contexte des véhicules routiers.

Dans un deuxième temps, une approche originale est introduite pour répondre spécifiquement aux contraintes de ce contexte : CLEAN-T. Il s'agit d'une méthode itérative, dans le domaine temporel avec une approche large bande, qui prend en compte les effets du déplacement des sources et qui comporte deux paramètres permettant d'affiner les résultats : le facteur de boucle et le critère d'arrêt. Une version filtrée en fréquence est également proposée et montre une amélioration de l'identification de sources secondaires dans certains cas. CLEAN-T présente l'avantage d'obtenir des signaux-sources temporels reconstruits, ouvrant la voie à d'autres analyses, en particulier l'utilisation de la cohérence avec des signaux issus de mesures embarquées pour la séparation des contributions de sources décorréelées.

MSA-PSF et CLEAN-T sont évaluées sur des simulations numériques puis testées expérimentalement en conditions contrôlées de laboratoire. Enfin, elles sont comparées à l'approche classique de formation de voies sur source mobile, dans le cadre d'une expérience avec véhicule en conditions réelles.

MOTS-CLÉS : antennerie, formation de voies, déconvolution, sources mobiles, effet Doppler, véhicules routiers, séparation de sources

Laboratoire (s) de recherche : Laboratoire de vibration et acoustique (LVA), Unité mixte de recherche en acoustique environnementale (UMRAE)

Directeur de thèse : Quentin Leclère

Président de jury :

Composition du jury : Jérôme Antoni, Michel Bérengier (invité), Alexandre Garcia, Quentin Leclère, François Ollivier, Marie-Agnès Pallas, Jean-Hugh Thomas

