



HAL
open science

Méthodes d'analyse des sources et champs acoustiques

Francois Ollivier

► **To cite this version:**

Francois Ollivier. Méthodes d'analyse des sources et champs acoustiques. Acoustique [physics.class-ph]. université pierre et marie curie, 2014. tel-01675033

HAL Id: tel-01675033

<https://hal.sorbonne-universite.fr/tel-01675033>

Submitted on 3 Jan 2018

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.

**École Doctorale Sciences Mécaniques, Acoustiques,
Énergétiques et Robotiques de Paris**

Discipline : Acoustique

MÉMOIRE D'HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES

présenté par

François OLLIVIER

**Méthodes d'analyse
des sources et champs acoustiques**

Soutenu le 29 octobre 2014 devant le jury composé de :

M. Joël	FRELAT	Chargé de recherche-HDR, CNRS,	Examineur
M. Alexandre	GARCIA	Professeur, CNAM	Rapporteur
M. Régis	MARCHIANO	Professeur, UPMC	Examineur
M. Charles	PÉZERAT	Professeur, Université du Maine	Rapporteur
M. Julien	DE ROSNY	Directeur de recherche, CNRS	Rapporteur

UPMC
Institut d'Alembert
Faculté d'Ingénierie
4, place Jussieu
75252 Paris Cedex 05

UPMC
Ecole Doctorale de Sciences
Mécaniques, Acoustiques,
Énergétiques et Robotiques
4 place Jussieu
75252 Paris Cedex 05

Table des matières

Introduction	5
1 Analyse acoustique de la dynamique des structures	7
1.1 Contexte	7
1.2 Principes de l'holographie acoustique de champ proche	8
1.3 Applications aux tables d'harmonie	13
1.4 L'holographie compressée	18
1.5 Perspectives pour l'holographie acoustique de champ proche	24
1.6 Autres études et projets en dynamique des structures	25
2 Imagerie et localisation des sources acoustiques	27
2.1 Mise en œuvre de la formation de voies standard	27
2.2 Applications	29
2.3 Formation de voies et principe de parcimonie	36
2.4 Localisation de sources en mouvement	43
2.5 Conclusions et perspectives	44
3 Identification des sources et du milieu de propagation	45
3.1 Identification de sources par approximation parcimonieuse	45
3.2 Interpolation de RIR par échantillonnage compressé	50
3.3 Beamforming en milieu complexe	52
3.4 Calibration géométrique des grands réseaux de microphones	53
3.5 Conclusions et perspectives	55
Conclusion	57
Bibliographie	59
Annexes	65
A Holographie impulsionnelle	65
B Holographie compressée	67
C Caractéristiques des micros MEMs	69
D Localisation de sources	70
Résumé	75

Introduction

Les travaux de recherche en acoustique à l'Institut ∂ 'Alembert, sur le campus de Saint-Cyr-l'école, s'articulent pour une part importante autour de l'analyse expérimentale des éléments des champs sonores.

L'étude de ces sujets a bénéficié de la conception et du développement de grands réseaux de microphones et de leurs enregistreurs numériques dédiés. Ces outils, construits spécifiquement et évoluant à l'occasion des projets successifs, ont permis de mettre au point des méthodes extensives de mesure et d'analyse des champs acoustiques audibles.

Un axe important a concerné la mise en œuvre de l'holographie acoustique de champ proche (NAH) par impulsion qui permet l'analyse modale rapide des structures vibrantes. Cette technique a été employée à l'étude de divers systèmes, en particulier les instruments de musique à table d'harmonie. Sur ce sujet une collaboration durable s'est établie avec le laboratoire de restauration du musée de la musique. La NAH impulsionnelle permet ainsi, associée à des modèles de dynamique des structure par éléments finis, de superviser la restauration d'instruments anciens. Elle a aussi été sollicitée pour contribuer à l'interprétation mécanique et à la modélisation des effets des précontraintes des tables d'harmonies. De façon plus marginale et en support de techniques classiques d'analyse des vibrations, la NAH a aussi été employée à l'étude du contrôle passif du rayonnement acoustique de structures minces ou du contrôle modal des vibrations pour la conception d'instruments actifs.

Parallèlement, pour localiser les sources acoustiques en champ lointain sur une large bande de fréquence, nous avons travaillé à l'optimisation numérique des géométries d'antenne et développé un système d'imagerie des sources en temps réel par la technique classique de formations de voies (BF). Dans le cadre du projet PREDIT-REBECA visant à l'étude du rayonnement extérieur des véhicules, nous avons mis au point une méthode d'analyse spatio-temporelle du bruit de roulement qui pourra être étendue à l'étude des sources instationnaires. Ce système d'imagerie par BF a fait l'objet de développements récents [1]. En adoptant une nouvelle technologie de microphones MEMS numériques et en adaptant les algorithmes d'imagerie au calcul parallèle sur GPU, il permet désormais l'observation en temps réel et le diagnostic dynamique des sources instationnaires large bande.

Le projet ANR-ECHANGE (2010-2013) a été l'occasion d'une exploitation intensive des moyens expérimentaux d'antennerie. L'objectif du projet était d'appliquer à l'analyse des champs acoustiques le concept de l'échantillonnage compressé, issu récemment des mathématiques et du traitement du signal. Ce concept est basé sur la modélisation parcimonieuse des objets acoustiques à identifier qui permet de faire appel à des algorithmes d'optimisation très puissants pour résoudre les problèmes inverses. Ces principes ont permis d'apporter des améliorations très significatives aux techniques d'analyse standard déjà citées (NAH[2] et BF[3]), mais aussi d'explorer de nouveaux champs.

Nous avons ainsi développé une méthode conjointe de localisation et identification des sources complexes en 3D basée sur une décomposition en harmonique sphérique et sur la parcimonie des sources dans l'espace[4]. Enfin pour l'interpolation de la partie initiale de réponses impulsionnelles de salles (RIR), voies de propagation acoustique en milieu réverbérant, un modèle de sources images a été adapté avec succès aux principes de l'échantillonnage compressé [5].

Au sein de l'équipe MPIA de ∂ 'Alembert, les deux dernières années ont été marquées par l'émergence d'un projet interne : $M\mu$. Il fait évoluer les réseaux de microphones et enregistreurs vers des systèmes acoustiques et numériques plus performants et dont la modularité permet d'envisager, à moyen terme, l'enregistrement synchrone de plusieurs milliers de microphones et

le déploiement de réseaux à très grande échelle. Cette perspective pose des problèmes fondamentaux de mise en œuvre (calibration, déploiement contrôlé, traitement de données massives ...) mais promet aussi le développement de nombreuses applications novatrices et l'évolution des techniques mises au point précédemment vers des meilleures performances et des fonctionnalités nouvelles. Un premier challenge sera relevé dans le cadre de la chaire MOVIE (UPMC-PSA/Renault) débutée en 2014 pour étudier l'impact humain du trafic automobile citadin. Il s'agira de déployer des grands réseaux de microphones en milieu urbain pour caractériser les sources et établir des cartographies objectives et perceptives du paysage sonore.

L'ensemble de ces travaux est mené dans deux objectifs complémentaires : premièrement, une meilleure appréhension de problèmes fondamentaux en acoustique et vibration tels l'identification des sources, la propagation en milieu confiné ou l'analyse dynamique des structures ; deuxièmement, le développement d'outils et méthodes susceptibles d'améliorer le diagnostic et les processus de conception.

Le présent mémoire compte trois chapitres qui relatent chacun un domaine particulier de l'analyse des sources et champs acoustiques. Les méthodes mises en œuvre sont replacées dans leur contexte scientifique et leurs objectifs sont mis en perspectives. Les résultats les plus marquants sont présentés. Certains sujets sont décrits plus exhaustivement soit parce qu'ils sont fondateurs de notre travail, soit parce qu'ils introduisent des concepts relativement nouveaux. D'autres sont évoqués plus succinctement, constituant une partie marginale ou non encore aboutie de nos recherches. Certains détails ou rappels sont reportés en annexes.

Chapitre 1

Analyse acoustique de la dynamique des structures

1.1 Contexte

L'étude du comportement dynamique d'une structure élastique peut intervenir dans sa phase de conception, ou dans un but de surveillance ou de diagnostic. Le but de cette étude est généralement de déterminer les fréquences et modes propres de vibration susceptibles de mettre la structure en résonance engendrant des effets néfastes (fatigue et ruine de la structure, rayonnement acoustique bruyant) ou au contraire désirés (rayonnement acoustique des tables d'harmonie d'instruments de musique, par exemple).

On procède à cette étude par deux moyens souvent complémentaires : l'analyse expérimentale et la modélisation numérique. Dans la phase de conception initiale ou corrective d'une structure élastique ou encore de prédiction de sa réponse à des excitations arbitraires (mais connues), le modèle numérique s'avère un outil indispensable. Lorsque la structure existe, que ses caractéristiques mécaniques sont inconnues (matériaux et/ou conditions d'assemblage), l'analyse expérimentale est nécessaire. Elle peut également venir en complément d'un modèle numérique dont les paramètres nécessitent souvent des ajustements. Notre travail s'inscrit dans ces objectifs expérimentaux pour apporter une méthode acoustique alternative aux méthodes vibratoires classiques.

Dans le milieu industriel et en recherche et développement, le moyen courant de la caractérisation dynamique des structures est l'analyse modale expérimentale (EMA). A cette méthode, dont la théorie fondamentale date des années 80 [6], est attaché un champ de recherche actif, en particulier pour l'identification des modes propres complexes des structures amorties ou des structures au comportement non linéaire. L'EMA procède en deux étapes : la première consiste à enregistrer la réponse de la structure étudiée à une excitation généralement contrôlée. L'enregistrement du couple excitation/réponse se fait ponctuellement conformément à un maillage prédéterminé pour acquérir toutes les informations nécessaires à l'analyse modale proprement dite qui constitue la seconde étape de l'EMA. Dans ce second temps, on résout un problème inverse pour identifier les paramètres modaux d'un modèle analytique discret de la structure : fréquences et déformées modales, masses, raideurs et amortissements modaux. Différents algorithmes sont mis en œuvre pour résoudre le problème inverse qui considèrent un modèle analytique de réponse de la structure temporel ou fréquentiel. Lorsque l'excitation de la structure n'est pas contrôlée, qu'elle est impossible à mesurer ou répartie, sans moyen de décomposition ponctuelle, ce qui est le cas des structures étudiées au cours de leur fonctionnement opérationnel, on parle d'analyse modale opérationnelle (OMA). Cette méthode fait l'objet de recherches spécifiques fondées sur l'analyse des seules réponses de la structure[7][8].

Notre travail sur l'holographie acoustique de champ proche (*Nearfield Acoustical Holography* (NAH)) contribue à l'objectif de l'analyse modale expérimentale des structures. Il se limite à la première phase de l'EMA en proposant sur une large gamme de fréquences une méthode rapide d'identification des déformées opérationnelles (ODS : *Operational Deflection Shapes*), et des fréquences de résonance associées. Ces ODS peuvent constituer les données d'entrée d'une

analyse modale dans le domaine des fréquences. Il faut noter, dans le cas des structures peu amorties, que les ODS et fréquences de résonances sont des approximations pertinentes et utiles des modes et fréquences propres. Leur identification peut être suffisante à certaines applications et ce point de vue a été adopté pour traiter la plupart de nos sujets.

Le premier chapitre présente d’abord le principe de la NAH et décrit la méthode expérimentale qui a été développée pour assurer l’analyse rapide de structures planes. On présente ensuite l’exploitation faite de cette technique pour l’étude d’instruments de musique à table d’harmonie, en particulier. La dernière partie décrit le développement d’une évolution algorithmique déterminante du système qui tire avantage de la nouvelle théorie de l’échantillonnage compressé (*Compressive Sampling* (CS)).

1.2 Principes de l’holographie acoustique de champ proche

En 1980, Williams et Maynard ont réhabilité [9] une technique réputée inexploitable pour la reconstruction des sources audibles *i.e.* à grande longueur d’onde du point de vue des ultrasons : l’holographie acoustique. Largement étudiée pour les hautes fréquences dans les années 70, la technique s’inspirait de son analogue optique et faisait appel à des sources auxiliaires de son cohérent pour reconstruire physiquement une source acoustique. Ces sources cohérentes auxiliaires, inconcevables aux basses fréquences, rendait impossible la transposition de la technique au domaine audible et aux vibrations. Mais les auteurs établissaient formellement et prouvaient expérimentalement que si la reconstruction d’une source vibrante ne pouvait se faire physiquement, elle était possible par des moyens numériques. L’inversion d’un modèle mathématique permet en effet de reconstruire virtuellement la source, et ce sans limite de résolution, à partir de l’enregistrement de son rayonnement acoustique par un réseau de microphones. Plus tard, les mêmes auteurs publiaient une formulation théorique [10] puis numérique [11] très précise de la technique d’holographie acoustique de champ proche sur laquelle notre travail s’est appuyé 10 années plus tard. Si la technique de la NAH en effet était arrivée à maturité d’un point de vue théorique, la puissance relativement réduite de systèmes électroniques d’acquisition des signaux acoustiques et des moyens numériques standard ne permettait pas à l’époque qu’elle soit mise en œuvre simplement et efficacement du fait des faibles dynamiques de numérisation et des capacités mémoire réduites des calculateurs. La méthode se limitait initialement à l’étude de sources harmoniques planes, et le concept s’est étendu ensuite aux structures de forme arbitraire [12], ouvrant la voie aux futurs développements de la méthode de rayonnement par éléments de frontière inverse (IBEM)[13, 14], en présentant toutefois des reconstructions très peu précises.

Fondamentalement la NAH consiste à analyser à une fréquence donnée le champ acoustique proche d’une structure vibrante, à réaliser numériquement une opération de propagation inverse pour remonter du champ de pression mesuré sur ce qu’il est convenu d’appeler l’hogramme, à la source vibratoire.

L’originalité de la méthode expérimentale mise au point au laboratoire a résidé dans sa capacité à acquérir très rapidement, et avec une grande densité, le champs acoustique de structures planes vibrantes, et à en extraire les composantes harmoniques sur une large bande de fréquences. L’opération de reconstruction holographique pouvant ensuite être appliquée à chaque composante harmonique.

Ces capacités ont été atteintes grâce à la conception et au développement d’un système d’acquisition acoustique exploitable par un système informatique standard. Une méthode originale d’excitation impulsionnelle contrôlée a aussi été mise au point pour assurer la répétabilité des expériences.

1.2.1 Développements technologiques

L’enregistreur numérique acoustique

Le laboratoire détient un savoir faire ancien en conception des systèmes électroniques de génération et d’acquisition des signaux acoustiques. Pendant longtemps mis en œuvre dans les domaines de l’imagerie médicale et de l’acoustique sous-marine pour piloter des réseaux phasés

de transducteurs piézoélectriques, ce savoir faire a été mis au service de l'imagerie des sources audibles autour des années 2000, débutant ainsi la recherche dans ce domaine au LMP. Pour ces recherches technologiques j'ai participé au développement des interfaces hard et soft du système d'acquisition des signaux acoustiques.

Un système a été développé dès l'origine pour numériser les signaux de 120 microphones. Les microphones en question étaient eux mêmes construits et conditionnés au laboratoire à partir de cellules à électret disponibles à moindre coût sur le marché. Un système de préamplification a également été conçu pour assurer la transmission à travers des câbles d'une dizaine de mètres. Le système électronique et les microphones ont été conçus par Pierre Alais et Hélène Moingeon, leur fabrication a été assurée par Christian Ollivon.

L'antenne dédiée à l'holographie est une structure rigide qui assemble les micros en un réseau plan rectangulaire régulier de 12×10 nœuds au pas de 50 mm. Elle couvre donc une surface totale de 550×450 mm.

Les versions successives de l'enregistreur numérique acoustique ont permis d'augmenter leur performance en terme de fréquence d'échantillonnage et de dynamique de numérisation. La version ultime de l'enregistreur numérique acoustique permet d'acquérir simultanément 128 voies (120 micros + 8 voies auxiliaires) échantillonnées à 32kHz avec une dynamique numérique de 24 bits. Les microphones ont une sensibilité nominale de 15 mV/Pa dans une gamme de niveau compris entre 60dB et 110dB. Ce système construit à plusieurs exemplaires a permis de mener à bien toutes les applications présentées dans ce mémoire pour lesquelles des antennes spécifiques ont été construites ou adaptées. L'un des ces systèmes est dédié à la captation des champs émis par les structures vibrantes pour leur analyse par holographie.

Il faut noter cependant que ces systèmes, s'ils sont encore largement utilisés à ∂ 'Alembert sont désormais obsolètes. En effet, le projet $M\mu$ qui sera évoqué plus loin, a été initié récemment profitant d'une avancée technologique majeure issue de la téléphonie mobile. En effet la large diffusion sur le marché industriel des microphones MEMs numériques a permis de développer un nouvel enregistreur plus performant et d'encombrement très réduit dont on travaille actuellement à l'extension à plusieurs centaines et à termes plusieurs milliers de voies acoustiques.

Impulsion de force contrôlée

Le but de notre méthode *in fine* est d'identifier les caractéristiques vibratoires des structures libres. Cette option exclue la liaison permanente à un système d'excitation extérieur, soit vibrant ou autre. L'alternative est bien connue des ingénieurs qui pratiquent l'analyse modale expérimentale. Il s'agit du marteau d'impact avec lequel l'expérimentateur applique une impulsion ponctuelle de force de façon répétée, en un seul point ou suivant un maillage prédéfini. Ce moyen permet d'exciter la structure en la laissant libre et en mobilisant l'ensemble de ses modes propres de vibration. La vibration et le champs acoustique impulsionnel résultants couvrent une bande de fréquence dont la largeur dépend des raideurs respectives de la structure et du marteau.

Pour reconstruire la source vibratoire avec une résolution suffisante, il peut être nécessaire de suréchantillonner le champ en répétant l'opération de mesure de la réponse acoustique impulsionnelle pour plusieurs positions de l'antenne. Pour conserver la même réponse d'un enregistrement à l'autre, un marteau automatisé a été développé afin de contrôler la force appliquée à la structure. L'instrument est construit autour d'un électroaimant dont le noyau mobile est l'impacteur. Le signal électrique rectangulaire qui commande le déplacement du noyau est contrôlé précisément en durée et en amplitude de façon à obtenir une force magnétique identique à chaque déclenchement. Un capteur piézoélectrique, solidaire du noyau mobile, mesure le signal de force appliquée à la structure.

Des signaux typiques de cet excitateur original sont présentés en annexe A.1.

Mesure large bande à haute densité

Le dispositif typique d'une expérience d'holographie impulsionnelle est présenté sur la figure 1.1

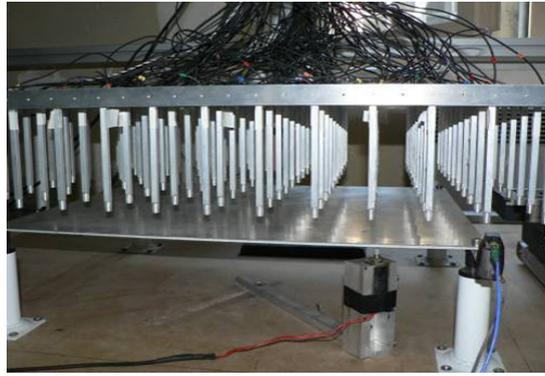


FIGURE 1.1 – Dispositif typique de l'expérience de NAH impulsif : Structure (plaque plane de dural), Antenne, Marteau électromagnétique

La force impulsif appliquée transversalement à la structure plane étudiée, engendre la superposition d'ondes de flexion sur une large bande de fréquence. Ces ondes caractérisent la réponse impulsif vibratoire de la structure libre. Elles sont dispersives et leur célérité c_f croît avec la fréquence. Lorsque la célérité est inférieure à celle, c , du son dans l'air, elle sont dites subsoniques et engendre des ondes acoustiques évanescentes qui, fortement atténuées en fonction de la distance, ne peuvent être mesurées qu'en champ proche de la structure. Nous verrons plus loin que ces ondes évanescentes portent une part essentielle de l'information vibratoire. Les composantes supersoniques engendrent des ondes propagatives qui détermineront le champ acoustique lointain, c'est à dire le rayonnement de la structure. La combinaison des ondes évanescentes et propagatives constitue la réponse acoustique impulsif proche. La figure 1.2 montre le signal mesuré par un micro situé à 25 mm d'une plaque de dural et le spectre large bande associé.

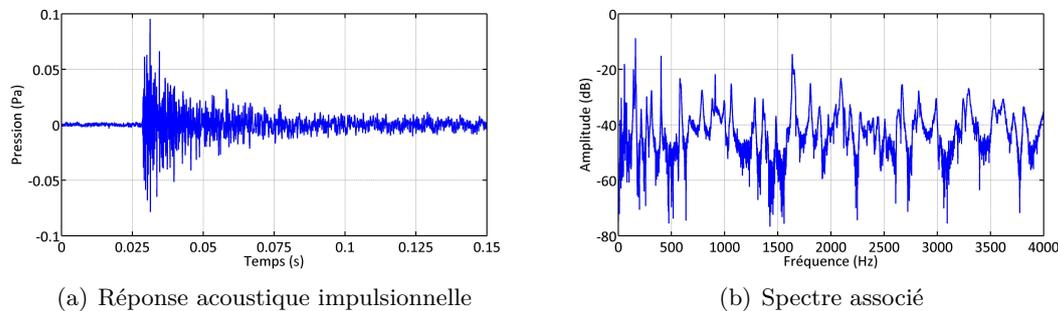


FIGURE 1.2 – Échantillon d'un hologramme

Comme on l'a déjà mentionné, pour assurer une reconstruction à haute résolution de la source vibratoire, il est nécessaire de densifier l'échantillonnage du champ acoustique. On répète donc l'enregistrement pour des positions entrelacées de l'antenne de base. Le dispositif permet de réaliser ainsi 16 enregistrements de quelques secondes et de disposer d'un hologramme de près de 2000 points en quelques minutes. Le maillage résultant est au pas de 12.5 mm, suffisant pour observer des phénomènes ondulatoires de 25 mm de longueur d'onde.

La dernière étape avant le traitement holographique proprement dit est l'analyse spectrale temporelle de l'hologramme. Selon les paramètres de l'analyse, c'est l'étape numériquement la plus coûteuse et, selon la puissance du ordinateur, potentiellement la plus longue. Elle fournit cependant la donnée d'entrée du processus holographique : les composantes harmoniques du champ acoustique proche. On peut identifier les contributions au rayonnement proche de ces composantes sur la courbe du spectre moyen des 1920 positions en figure 1.4. Noter sur la même figure que les spectres moyens acoustique et vibratoire (mesuré au vibromètre laser) sont parfaitement conformes. La dynamique de la mesure acoustique cependant est sensiblement moindre, ce qui perturbe la reconstruction des composantes de faible niveau.

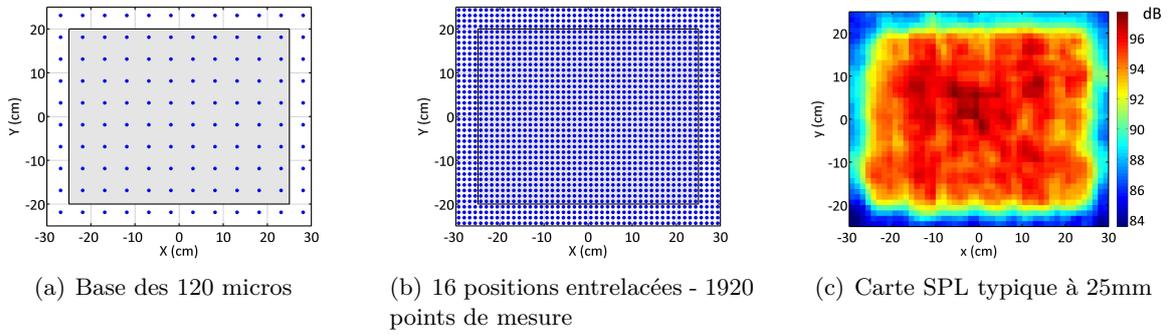


FIGURE 1.3 – Agencement de l'antenne - Champ SPL d'un hologramme

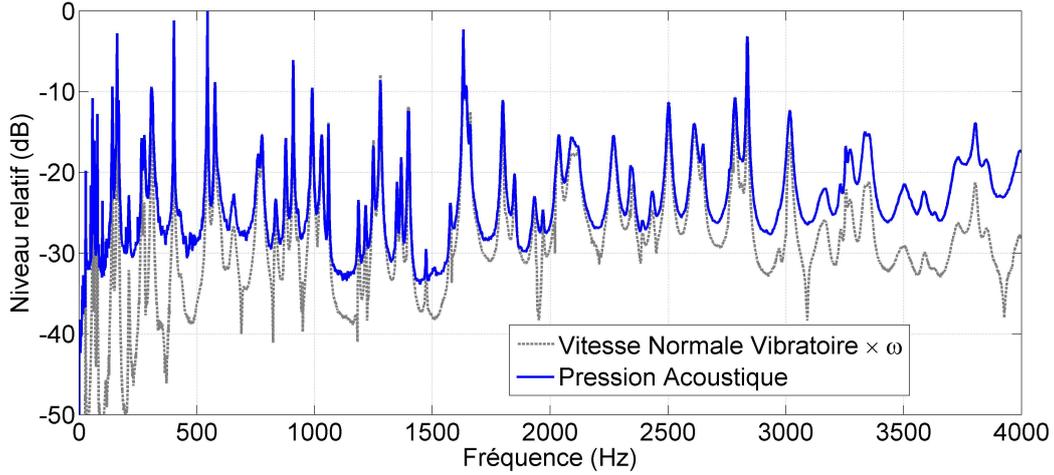


FIGURE 1.4 – Spectre moyen des champs acoustique (mesuré par l'antenne) et vibratoire (mesuré au vibromètre laser)

1.2.2 Aspects théoriques et algorithmiques

Dans son état actuel de développement, la méthode est limitée à l'étude des structures planes afin de profiter des hautes performances des algorithmes de transformée de Fourier rapide [15] exploitable dans le cas d'une inversion de la propagation de plan à plan.

Formulation numérique standard

Soit (S) une structure vibrante plane dont la surface inscrite dans le plan $(x, y, 0)$ est animée d'une onde de flexion de pulsation ω , caractérisée par un champ de vitesse normale noté $\dot{w}(x, y, 0, \omega)$. Le couplage entre la surface vibrante et l'air environnant engendre la propagation d'une onde acoustique. La pression dans un plan z_0 issue de $\dot{w}(x, y, 0, \omega)$ est donnée la convolution de la distribution source avec le propagateur $g(x, y, z) = g(\vec{r}) = -i\rho ck \frac{e^{ikr}}{2\pi r}$:

$$p(x, y, z_0) = g(x, y, z_0) \star_{xy} \dot{w}(x, y, 0) \quad (1.1)$$

L'opérateur \star_{xy} exprime la convolution suivant les variables en x and y , c la célérité du son dans l'air, ρ la masse volumique de l'air et $k = \omega/c$ le nombre d'onde. La transformée de Fourier spatiale 2-D (suivant x et y) de cette équation donne le spectre spatial de la pression sur l'hologramme :

$$P(k_x, k_y, z_0) = G(k_x, k_y, z_0) \dot{W}(k_x, k_y, 0). \quad (1.2)$$

où k_x et k_y sont les nombres d'onde dans les directions x et y .

La formulation numérique de la NAH standard utilise une version discrétisée des équations 1.1 et 1.2 . La pression et la vitesse normale de la structure sont échantillonnées régulièrement

dans leur plan respectif ($z = 0$ et $z = z_0$), leur transformée de Fourier spatiale est approchée par sa version discrète (TFD) :

$$\mathbf{Fp} = \mathbf{GF}\dot{\mathbf{w}} \quad (1.3)$$

où :

- $\dot{\mathbf{w}}$ est le vecteur des vitesses normales à identifier échantillonné sur un maillage rectangulaire régulier,
- \mathbf{p} est le vecteur des pressions mesurées également échantillonné dans le plan (z_0 de l'hologramme),
- \mathbf{F} est l'opérateur de TFD 2D, et
- \mathbf{G} une matrice diagonale dont les éléments diagonaux valent G échantillonné selon les vecteurs d'onde de base de la TFD.

La pression dans le plan de mesure s'écrit en fonction de la vitesse normale de la structure :

$$\mathbf{p} = \mathbf{F}^{-1}\mathbf{GF}\dot{\mathbf{w}} = \mathbf{H}\dot{\mathbf{w}} \quad (1.4)$$

Le produit matriciel $\mathbf{F}^{-1}\mathbf{GF}$ est noté \mathbf{H} et sa transposée conjuguée \mathbf{H}^* .

La résolution du problème inverse fournit une estimation de la distribution de vitesse normale sur la structure, estimation notée $\hat{\mathbf{w}}$. L'inversion naïve de l'équation (1.4) donne :

$$\hat{\mathbf{w}} = \mathbf{F}^{-1}\mathbf{G}^{-1}\mathbf{Fp} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{p} \quad (1.5)$$

où \mathbf{G} , matrice diagonale, est facilement inversible. Cependant le problème inverse est très instable et sa régularisation est nécessaire. Le caractère "mal posé" ("*ill-posed*") provient de l'inversion des composantes évanescentes du propagateur \mathbf{G} qui résulte en l'introduction de facteurs d'amplification exponentiels. L'application de ces facteurs au bruit inévitablement contenu dans la mesure de pression ruine la reconstruction de la source. L'hologramme p doit être capté à faible distance z_0 en sorte de collecter l'information décisive portée par les ondes évanescentes qui s'atténuent rapidement en fonction de la distance, exponentiellement dans le cas des structures planes. Cependant le champ mesuré est contaminé par des bruits de différentes natures (mesure, numérique,...). De ce fait le processus de rétropropagation 1.5 et de reconstruction peut être ruiné par l'amplification exponentielle des composantes évanescentes et du bruit qui se trouve dans la même région spectrale (courtes longueurs d'onde et hautes fréquences spatiales). D'où la nécessité d'une étape de régularisation pour adapter l'opérateur de rétropropagation.

Régularisation standard de la NAH

Une bonne solution pour l'opération de régularisation consiste en un simple filtrage passe-bas de l'opérateur de propagation dans le domaine des nombres d'onde (k_x, k_y). Le filtre est caractérisé par deux quantités : le nombre d'onde de coupure k_c et la pente, réunis dans un même paramètre de régularisation noté λ . L'optimisation de ce paramètre a donné lieu à une littérature abondante [16, 17, 18] qui compare les performances de différents algorithmes. Le plus efficace est la régularisation de Tikhonov qui est largement utilisé pour résoudre en général les problèmes inverses "mal posés". La méthode consiste à résoudre le problème de minimisation suivant :

$$\hat{\mathbf{w}} = \min_{\dot{\mathbf{w}}} \{ \|\mathbf{p} - \mathbf{G}\dot{\mathbf{w}}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{L}\dot{\mathbf{w}}\|_2^2 \} \quad (1.6)$$

où \mathbf{L} est appelé matrice de Tikhonov. La solution analytique de ce problème s'écrit :

$$\hat{\mathbf{w}} = \mathbf{H}_\lambda \mathbf{G}^{-1} \mathbf{p} \quad (1.7)$$

avec :

$$\mathbf{H}_\lambda = (\mathbf{G}^H \mathbf{G} + \lambda \mathbf{L}^H \mathbf{L})^{-1} \mathbf{G}^H \mathbf{G} \quad (1.8)$$

Dans la mise en œuvre la plus simple de cet algorithme, \mathbf{L} est choisi comme la matrice identité identity matrix. On montre alors que \mathbf{H}_λ agit comme un filtre spatial passe-bas. Suivant les suggestions de [16], nous avons choisi une approche différente qui construit un filtre plus efficace. Dans ce cas la matrice \mathbf{L} s'écrit :

$$\mathbf{L} = (\lambda \mathbf{I} + \mathbf{G}^H \mathbf{G})^{-1} \lambda \mathbf{I} \quad (1.9)$$

Le paramètre de régularisation a pour objectif de limiter l'énergie de la source estimée $\hat{\mathbf{w}}$. Ce qui affecte toutes les composantes du spectre. Cependant seules les composantes ayant un nombre d'onde élevé explose à la reconstruction. La matrice \mathbf{L} consiste donc en un filtre passe-haut pour compenser les effets du filtre de Tikhonov qui privilégie les composantes basse fréquence du spectre \mathbf{p} de l'hologramme.

L'estimation objective du meilleur paramètre de régularisation λ requiert une méthode d'arrêt de l'algorithme. On utilise généralement les méthodes de la courbe en L ou la validation croisée généralisée (GCV)[19] parce qu'elle ne nécessite aucune information *a priori* sur la source ou la mesure, en particulier sur le niveau et la variance du bruit. Les deux méthodes ont été mises en œuvre mais la GCV se montre plus performante dans le cas considéré [16, 18]. Son principe est de déterminer la valeur du paramètre λ qui minimise la fonction suivante :

$$E_{GCV} = \frac{\|\mathbf{G}\hat{\mathbf{w}} - \mathbf{p}\|_2^2}{(\text{Trace}(\mathbf{I} - \mathbf{H}_\lambda))^2} \quad (1.10)$$

Au numérateur figure l'énergie du résidu de la solution régularisée, le dénominateur évalue la perte d'information induite par le filtrage. C'est à dire que la GCV trouve le meilleur compromis entre le résidu (l'écart à la mesure) et le taux de régularisation (l'étendue du filtrage).

Pour valider la méthode, des reconstructions holographiques d'ODS de la plaque de Dural présentée plus haut (cf fig. 1.1) ont été comparées aux mesures directes de son champ vibratoire effectuées au vibromètre laser à balayage. La figure 3.9 (cf. annexeA.2) montre que les performances de reconstruction de la méthode sont très bonnes avec plus de 80% de corrélation estimation/mesure, sur l'essentiel du spectre jusqu'à 3 kHz. Les baisses de performances interviennent dans les creux du spectre où le rapport signal à bruit des mesures acoustique et vibratoire est plus faible.

La technique a été améliorée au cours des années parallèlement à sa mise en œuvre pour étudier en particulier les tables d'harmonie des instruments de musique soit pour leur restauration, soit pour la compréhension des principes de facture comme l'exposent les paragraphes suivants.

1.3 Applications aux tables d'harmonie

1.3.1 Assistance à la restauration et à la modélisation

Le clavecin Couchet

Le musée de la musique de Paris a acquis en 2003 un clavecin construit en 1652 par I. Couchet, facteur réputé de l'époque exerçant à Anvers. Cet instrument, "trésor" national, constitue un des rares exemples du savoir-faire de Couchet et reflète la popularité des instruments flamands qui ont fortement influencé l'évolution de la musique en France sous le règne de Louis XIV. Ce clavecin a subi après sa fabrication des modifications esthétiques réalisées par de grands artistes (peintures "grotesques" sur fond doré, sculptures) qui font de l'instrument une œuvre d'art particulièrement rare du mobilier national et témoigne du goût en matière de mobilier, à la cour, à la fin du 17ème siècle.

Au moment de son acquisition le clavecin était très abîmé. Certaines parties, dont la table d'harmonie, étaient détériorées notamment sous l'effet de la tension des cordes. Le musée s'est fixé pour objectif la restauration de l'instrument dans le but de le rendre jouable à nouveau. L'enjeu de cette restauration était de diminuer les contraintes permanentes de la structure, en modifiant aussi peu que possible la réponse dynamique de la structure, dans le but d'approcher au plus près du son original de l'instrument. Les clavecins de cette époque bien conservés, restaurés et en état de jeu sont rares et la littérature ne compte que quelques études scientifiques de leur comportement vibroacoustique auxquelles viennent s'ajouter des études sur le piano [20, 21, 22, 23, 24]. Dans ces études, les résultats fournis sur les tables d'harmonie sont relativement

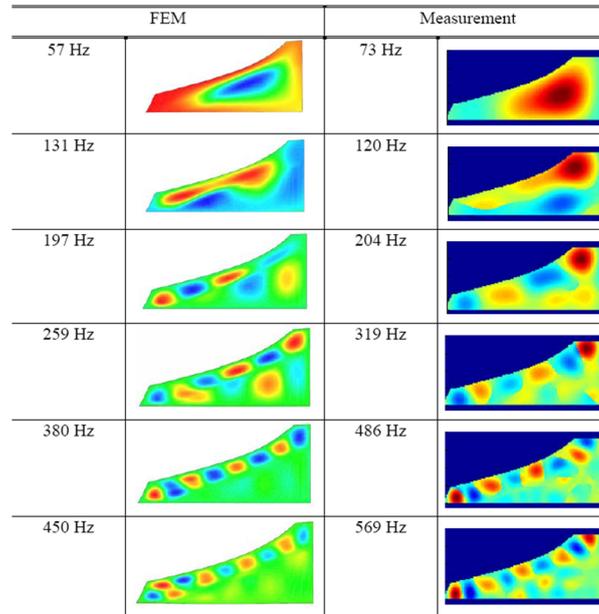


FIGURE 1.6 – Clavecin Couchet : Correspondance des modes EF / ODS expérimentales

à 1200 Hz. Les déformées opérationnelles les plus pertinentes reconstruites par NAH sont comparées sur la figure 1.6 aux modes correspondant identifiés numériquement. Elles présentent des bords fixes conformes aux conditions aux limites de collage. La mise en évidence de deux zones de souplesse différente séparée par le chevalet du registre 8 pieds corrobore les résultats du modèle numérique. Les déformées caractérisées par les nombres de ventres et de lignes nodales sont bien identifiées et ordonnées correctement. Il faut noter un écart non négligeable des fréquences de résonance expérimentales et des fréquences propres numériques. Plusieurs raisons peuvent expliquer cet écart : les paramètres matériaux du modèle EF pour les différentes essences de bois sont issus de la littérature, faute de pouvoir les mesurer ; les modèles de conditions aux limites ainsi que celui de la précontrainte imposée par les cordes sont très approximatifs.

Néanmoins le modèle numérique du clavecin est validé et sera exploité pour prédire les effets de futures opérations de restauration. La NAH aura permis d'établir un point "zéro" du clavecin Couchet restauré. Elle pourra être mise en œuvre à nouveau d'une part pour évaluer l'efficacité des restaurations futures, suivre les effets de l'utilisation de l'instrument en concert ou pour des expositions (transport, jeu, accordage, ...).

Cette méthodologie de conservation associant modélisation numérique et méthode expérimentale a été décrite à l'attention de la communauté muséale [26]. La partie qui suit présente une mise en œuvre un peu différente dans la perspective de la fabrication d'un fac-simile de vihuela.

La Vihuela de Mano

Au 16ème siècle, la vihuela, instrument à 12 cordes, constitue le pendant ibérique du luth. Il n'en existe plus à ce jour que 3 exemplaires certifiés. La vihuela de Mano, dite aussi *Chambure*, du nom de son donateur, n'a été redécouverte qu'en 1998 et cédée au musée de la musique pour sa conservation.(Figure 1.7).

Aucun de ces exemplaires subsistants n'est en état de jeu, et comme par ailleurs il n'existe aucun enregistrement de la vihuela, nul ne sait quel était le son de cet instrument.

Pourtant la vihuela tient une place particulière dans l'histoire de la musique. En effet de nombreuses partitions existent et des écrits abondent décrivant la technique de jeu.

Étant donné l'état de dégradation de la vihuela Chambure, il n'est pas possible d'envisager sa restauration à l'état de jeu. Aussi l'objectif du Musée de la musique est de fabriquer une réplique aussi proche que possible des principes originaux de facture en espérant obtenir de

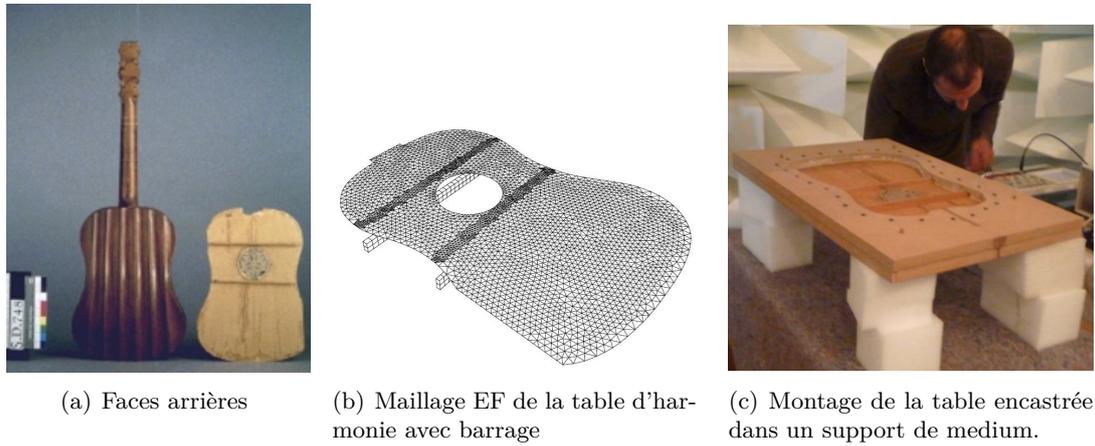


FIGURE 1.7 – *Vihuela de mano*. Collection du Musée de la musique. Paris. E.0748.

cette réplique le son de la vihuela originale, quitte à exiger de l'interprète l'adaptation de son jeu.

Dans le but de fournir à un facteur les informations requises pour la fabrication, on a développé un modèle numérique de la table d'harmonie et mené conjointement une étude expérimentale pour en affiner les paramètres[27], étude expérimentale fondée sur la NAH impulsionnelle. Ce travail est fait en collaboration avec Sandie Leconte, Sylvie Le Moyne et Julien Colmar. Un article de revue rendant compte de ce travail est en cours de rédaction.

En l'état actuel, la table originale est amputée d'une portion dans la partie inférieure gauche(cf. fig.1.7 (a) et (b)). Pour l'expérience, comme dans le modèle, la table d'harmonie, désolidarisée de la caisse, est encastrée dans un support de médium très massif et très raide (cf. fig.1.7(c)).

Pour la mesure NAH, l'excitation impulsionnelle de la table qui est d'une extrême fragilité, est réalisée à l'aide du marteau électromagnétique en appliquant l'impact au support dont la masse est très supérieure à celle de la table. On fait l'hypothèse en l'occurrence que l'impact induit une accélération impulsionnelle du support dont on néglige la déformation vis à vis de celle de la table (bande et amplitude). On considère ainsi une accélération rigide du support qui communique à la table une impulsion de force d'inertie uniforme et engendre la vibration libre de la table encastrée. Cette approximation est justifiée par la cartographie de l'énergie du champ acoustique mesuré à 3 cm. Celle-ci est essentiellement circonscrite au contour de l'encastrement de la table. La mesure holographique est ainsi supposée représenter la réponse acoustique impulsionnelle de la table, à un effort réparti inconnu.

La mesure holographique permet d'établir d'abord une bande de fréquence exploitable entre 100 et 1500 Hz.

Le modèle éléments finis dans cette bande indique que le champ d'épaisseur réel de la table influence de façon significative les modes propres en haute fréquence et qu'il doit donc être considéré dans la fabrication du facsimilé.

La comparaison des déformées opérationnelles obtenues par NAH avec celles issues du modèle EF fournit des corrélations acceptables pour une dizaine de modes en basses fréquences. En moyenne et plus hautes fréquences, les spectres moyens du modèle et de la mesure diffèrent sans qu'il soit possible d'interpréter clairement cette différence.

La suite du projet, toujours en quête d'une carte d'identité mécanique de la vihuela originale, devra d'une part accorder les conditions aux limites du modèle et de l'expérience en choisissant vraisemblablement des conditions plus mobiles qu'un encastrement strict de la table dans le support. D'autre part il faudra trouver une modélisation pertinente pour les nombreuses "blessures" de la table qui sont susceptibles d'affecter sa dynamique.

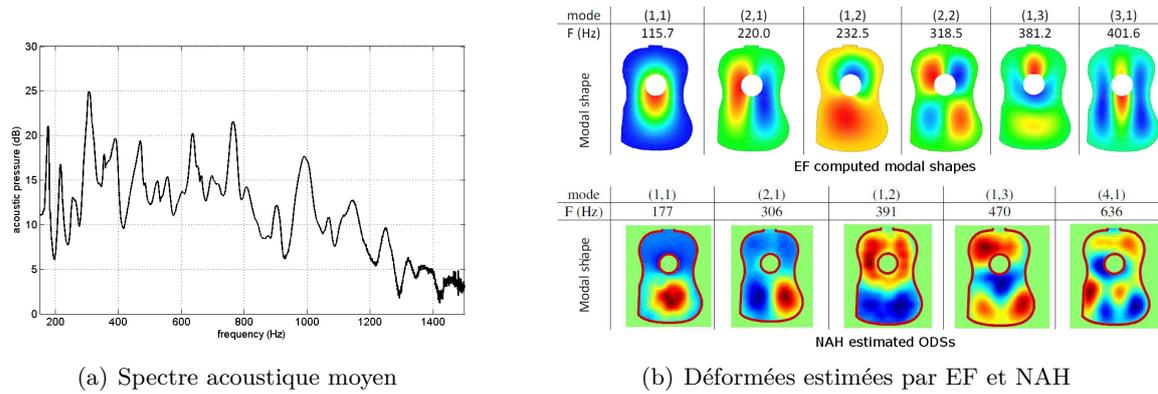


FIGURE 1.8 – Vihuela de mano : Mesure de rayonnement acoustique de la table d'harmonie et estimation d'ODS par NAH

1.3.2 Étude des effets des précontraintes

La mise en précontrainte des tables d'harmonie d'instruments à corde est souvent jugée primordiale par les facteurs d'instruments. La thèse d'Adrien Mamou-Mani (Dir. J. Frelat et C. Besnainou) s'est intéressée plus particulièrement au cas du piano moderne pour lequel la précontrainte provient de deux chargements distincts : le flambage associé au collage du barrage et la mise en tension des cordes attachées à un cadre en fonte découplé de la table. Contrairement au cas du clavecin vu plus haut les cordes n'appliquent leur effort qu'au niveau du chevalet.

A. Mamou-Mani a modélisé numériquement l'effet de ce double chargement par éléments finis [28], et proposé un modèle analytique pour une structure simplifiée [29]. Ces modèles montrent comment les précontraintes affectent le comportement vibratoire linéaire et non linéaire et en particulier les fréquences propres de la table.

Pour valider ces modèles, nous avons mené une étude expérimentale faisant appel à la NAH impulsionnelle. Pour cette expérience une maquette très simplifiée de table d'harmonie a été conçue. Elle permet d'appliquer à une plaque d'épicéa un chargement contrôlé dans le plan et d'imposer le flambement de la plaque. Parallèlement on contrôle la tension et l'angle transverse d'une corde pour charger la table par l'intermédiaire d'un chevalet. Une image et un schéma du dispositif sont présentés figure 1.9.

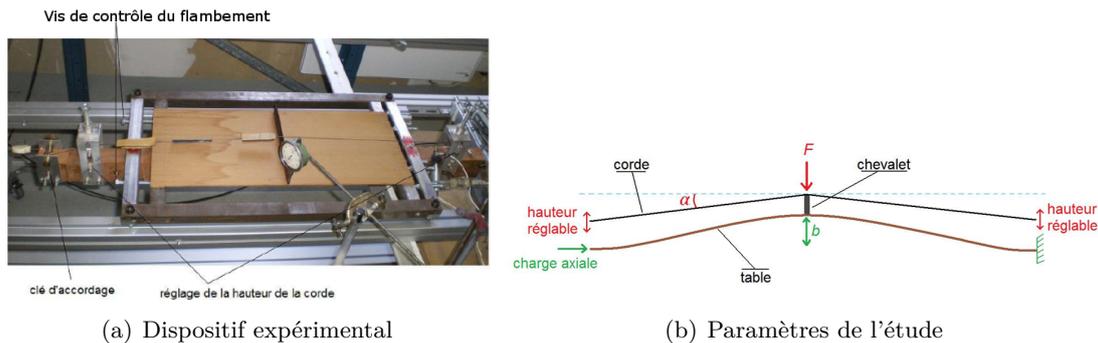


FIGURE 1.9 – Étude expérimentale de l'effet des précontraintes dans les tables d'harmonie

Les modes résonants sont mesurés par holographie acoustique. On suit ainsi facilement l'évolution des fréquences de résonance et les déformées opérationnelles associées en fonction du niveau des précontraintes.

Les résultats de cette étude paramétrique expérimentale sont présentés sur la figure 1.10 et présentés dans [30].

Certains modes caractéristiques sont représentés figure 1.10(a). L'effet de la charge de flambement sur leur fréquence de résonance est reporté figure 1.10(b). En deçà de la charge critique, les fréquences diminuent. Au delà lorsque le flambement est intervenu, pour les modes qui pré-

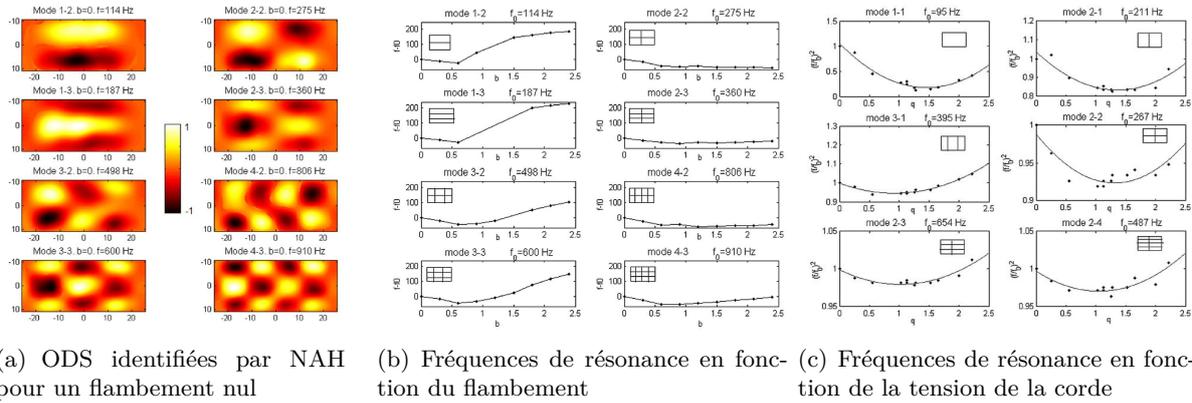


FIGURE 1.10 – Synthèse des résultats expérimentaux du modèle de table d'harmonie précontrainte

sentent une ligne nodale au niveau du chevalet placé au centre (modes pairs dans la longueur), les fréquences ne sont pas affectées. En revanche pour les modes qui n'ont pas cette symétrie médiane (modes impairs dans la longueur), on peut noter une forte augmentation de la fréquence de résonance. Ce résultat généralise en 2D celui établi par d'autres auteurs pour des poutres. Par ailleurs, comme indiqué par la figure 1.10(c), on observe que le niveau de la charge transverse (tension + angle de la corde) engendre une variation quadratique de la fréquence de résonance ce qui confirme le résultat théorique établi précédemment.

Ces résultats confirment la pertinence de l'hypothèse des grands déplacements statiques pour modéliser les effets des précontraintes sur la dynamique des tables d'harmonie. Ils établissent aussi les effets combinés de la contrainte plane et de la charge transverse.

Evaluation de capteurs pression-vitesse la NAH

Sur le plan théorique, il a été établi [31] que l'holographie de champ proche bénéficierait de la mesure directe de la vitesse particulière du champ acoustique proche. Celle-ci en effet est la véritable donnée d'entrée du processus inverse holographique. La méthode courante utilise un hologramme en pression qui permet de synthétiser la vitesse par l'intermédiaire de l'équation d'Euler et de la mesure du gradient de pression. Mais cette synthèse est aveugle autour de la fréquence de coïncidence de la structure.

Assez récemment des capteurs de vitesse acoustique, ont été commercialisés. Ils sont fondés sur une technologie de fil chaud et permettent une mesure locale directe de la vitesse.

Dans le cadre d'un contrat d'étude avec PSA, nous avons pu évaluer l'holographie de champ proche par mesure directe de la vitesse acoustique grâce à la mise à disposition de 6 de ces nouveaux capteurs qui ont été utilisés conjointement en constituant une petite antenne. Les conclusions de ce travail expérimental [32] corroborent les prédictions théoriques et valident l'avantage de la mesure directe de la vitesse. Mais le caractère non linéaire du capteur à fil chaud et l'hétérogénéité de l'ensemble, au moment de l'étude, rendait l'acquisition de l'hologramme en vitesse trop complexe pour envisager une mise en oeuvre systématique en réseau.

1.4 L'holographie compressée

Le projet ANR ECHANGE a eu comme premier terrain de jeu expérimental l'holographie acoustique de champ proche. Cette étude a constitué la première partie de la thèse d'Antoine Peillot[33].

En l'occurrence, il s'est agi de mettre en oeuvre l'échantillonnage compressé ('Compressive Sampling' = (CS)) dans la perspective de réduire significativement le nombre de points de mesure utile à une reconstruction acceptable des structures vibrantes. Or le succès d'une identification par CS est fondé sur un modèle parcimonieux de l'objet à reconstruire. S'agissant

de la vibration d'une structure la décomposition modale sur une base de fonctions orthogonales est naturellement adaptée.

Comme on l'a vu plus haut les concepts de la NAH sont relativement simples, particulièrement dans le cas des structures planes. Pourtant sa mise en œuvre expérimentale est lourde nécessitant le déploiement de nombreux micros encombrés de leur câbles et conditionneurs divers.

Par ailleurs le traitement des données se heurte à des problèmes assez classiques mais complexes de régularisation de problème inverse. Pour l'holographie de champ proche il s'agit, dans le processus de rétropropagation, d'éviter l'amplification exponentielle du bruit contenu dans les ondes évanescentes. La solution communément utilisée est un filtrage passe-bas optimisé dans l'espace des nombres d'onde par la méthode de Tikhonov. Si cette solution est efficace, elle présente l'inconvénient d'éliminer les hautes fréquences spatiales ce qui a pour effet de nuire à la reconstruction des discontinuités du champ vibratoire présentes en particulier au niveau des bords libres. De plus la reconstruction de champ de déplacements dynamiques caractérisés par des petites longueurs d'ondes nécessite un échantillonnage fin du champ acoustique, donc plus de microphones et d'encombrement, ou une durée de mesure plus grande mais aussi une quantité d'information à traiter plus importante.

Dans le cadre du projet ECHANGE, nous avons démontré[2], pour des structures planes de forme arbitraire, que l'utilisation des principes de parcimonie éventuellement associés à ceux de l'échantillonnage compressé permet d'apporter des améliorations substantielles aux performances de la NAH.

On peut résumer en trois points les contributions notables de ce travail :

On peut identifier une base dans laquelle le champ vibratoire à reconstruire peut s'écrire, avec une bonne approximation, comme combinaison linéaire d'un très petit nombre de fonctions de base élémentaires, c'est à dire avec parcimonie. Cette base choisie judicieusement à partir d'*a priori* physiques ou mathématiques, est appelée dictionnaire de parcimonie.

Comme le principe de parcimonie se fonde sur un modèle déterministe, il porte intrinsèquement des propriétés de régularisation, et les champs vibratoires reconstruits suivant ce principe sont en très bon accord, sans perte de hautes fréquences spatiales, avec des solutions de référence mesurées directement au vibromètre laser.

Enfin, la méthode utilisée reste efficace lorsque le champ acoustique est sous échantillonné au sens de Shannon. Les principes de l'échantillonnage compressé permettent en effet de prendre en compte des *a priori* de parcimonie dès l'étape d'acquisition en réduisant beaucoup le nombre de mesures ponctuelles.

D'après la théorie du CS cependant, l'identification des coordonnées dans la base de parcimonie nécessite une relation d'incohérence entre la mesure et le dictionnaire. Cette relation d'incohérence est obtenue assez simplement en choisissant une distribution spatiale pseudo-aléatoire des microphones. Plusieurs cas de distribution ont été testés et ont prouvé la validité du concept. On a d'abord sélectionné aléatoirement un sous ensemble de micros dans l'antenne de grande densité (c.f. figure 1.3). Ensuite une antenne dédiée à distribution pseudo-aléatoire a été utilisée.

Les résultats de ces expériences sont présentés dans ce qui suit et discutés en termes de robustesse vis à vis des erreurs de calibration, de qualité de reconstruction des discontinuités et du nombre de mesures prises en compte. On expose également la processus conduisant à la définition d'un dictionnaire de parcimonie pertinent, les différents algorithmes de reconstructions favorisant la parcimonie et adaptés au problème plan. Finalement on discute l'extension possible de ces principes à un contexte plus large.

Noter que l'ensemble des données et codes issus de ce travail sont en accès libre [34].

1.4.1 Principe de parcimonie

Le principe de parcimonie est utilisé dans de nombreuses applications : compression de données, séparation de sources, analyse du signal, etc. En mathématique, un signal est dit parcimonieux lorsqu'il peut être décomposé en une combinaison linéaire d'un petit nombre de fonctions de bases prédéfinies, que nous appellerons *atomes* par la suite. Plus précisément, on appelle

dictionnaire \mathcal{D} un ensemble, supposé fini de taille M d'atomes $\mathbf{d}_k \in \mathbb{R}^N$: $\mathcal{D} = \{\mathbf{d}_k\}_{k=1,\dots,M}$. Le dictionnaire peut constituer une base de \mathbb{R}^N ($M = N$) ou bien une famille redondante décrivant \mathbb{R}^N ($M > N$), c'est à dire dont les éléments ne sont pas nécessairement orthogonaux. On dit d'un signal discret de longueur finie $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N$ qu'il est parcimonieux (ou *sparse*) dans \mathcal{D} s'il existe un ensemble de coefficients α_j tel que :

$$\mathbf{x} = \sum_{j \in J} \alpha_j \mathbf{d}_j \quad (1.11)$$

où J est un sous-ensemble de $\{1, \dots, M\}$ de taille beaucoup plus petite : $\mathbf{Card}(J) \ll M$. Cette décomposition peut être exacte (le signal est exactement parcimonieux) ou approximative (le signal est comprimé par la décomposition). Quoi qu'il en soit, si \mathcal{D} est redondant, il n'y a pas pour un signal \mathbf{x} donné de décomposition unique sous la forme de l'équation 1.11. L'objectif du processus d'identification est de trouver l'ensemble α le plus petit ou celui qui assure le meilleur équilibre entre exactitude et parcimonie. Pour ce faire, un grand nombre d'algorithmes existe. Dans le cas particulier de la NAH, ceux fondés sur la minimisation de la norme ℓ_1 se sont montrés plus adaptés, nous y reviendrons plus loin. Pour introduire la parcimonie dans le cas de la NAH, on fait l'hypothèse que le champ de vitesse normale de la source plane peut s'écrire de façon approchée dans une base appropriée :

$$\hat{\mathbf{w}} = \mathbf{D}\alpha \quad (1.12)$$

où le vecteur α n'a que $\mathbf{Card}(J)$ éléments non nuls et $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{N \times M}$ est une matrice constituée par les atomes du dictionnaire \mathcal{D} disposés en colonnes. Si cette hypothèse est correcte on peut reformuler le problème inverse de la NAH (c.f. eq. 1.4) de la façon suivante : pour un champ de pression discret mesuré \mathbf{p} (l'hologramme), trouver l'ensemble de coefficients α le plus parcimonieux tel que $\mathbf{p} = \mathbf{H}\mathbf{D}\alpha$. En introduisant la pseudo-norme ℓ_0 du vecteur α qui compte le nombre de ses composantes non nulles ($\ell_0(\alpha) = \|\alpha\|_0 = \mathbf{Card}(J)$), le problème s'écrit en termes mathématiques :

$$\underset{\alpha}{\operatorname{argmin}} \|\alpha\|_0 \quad \text{t.q.} \quad \mathbf{p} = \mathbf{H}\mathbf{D}\alpha \quad (1.13)$$

1.4.2 Algorithmes de minimisation de la norme ℓ_1

Malheureusement la norme ℓ_0 n'est pas convexe, et la solution exacte de ce problème combinatoire est généralement ingérable. Des méthodes existent cependant qui permettent d'obtenir une approximation pertinente de la solution. Ces techniques dites "gloutonnes" se sont montrées peu efficaces dans le cas de la NAH. Mais nous y reviendrons lorsqu'on abordera le problème de la localisation et de l'identification des sources.

Si on décide d'abandonner la norme ℓ_0 , on peut cependant "relâcher" le problème en considérant plutôt de minimiser la norme ℓ_1 qui évalue la somme des valeurs absolues des coordonnées du vecteur : $\ell_1(\alpha) = \|\alpha\|_1 = \sum_k |\alpha_k|$. Le problème s'écrit alors :

$$\underset{\alpha}{\operatorname{argmin}} \|\alpha\|_1 \quad \text{t.q.} \quad \mathbf{p} = \mathbf{H}\mathbf{D}\alpha \quad (1.14)$$

La norme ℓ_1 étant convexe donne accès à des algorithmes d'optimisation très puissants.

En pratique lorsque du bruit est présent dans la mesure, on formule le problème différemment en considérant une contrainte énergétique de fidélité entre la solution *sparse* et la mesure :

$$\underset{\alpha}{\operatorname{argmin}} \|\alpha\|_1 \quad \text{t.q.} \quad \|\mathbf{p} - \mathbf{H}\mathbf{D}\alpha\|_2^2 < \epsilon \quad (1.15)$$

Cette approche, que nous appelons L1 par la suite, n'est pas parfaitement objective dans la mesure où le niveau de fidélité ϵ nécessite un accordage dont on discute plus loin.

Finalement pour se rapprocher de la formulation classique de la régularisation de Thikonov, vue plus haut (§1.2.2, on peut réécrire le problème sous sa forme lagrangienne équivalente, connue sous l'appellation LASSO [35] :

$$\underset{\alpha}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{p} - \mathbf{H}\mathbf{D}\alpha\|_2^2 + \lambda \|\alpha\|_1 \quad (1.16)$$

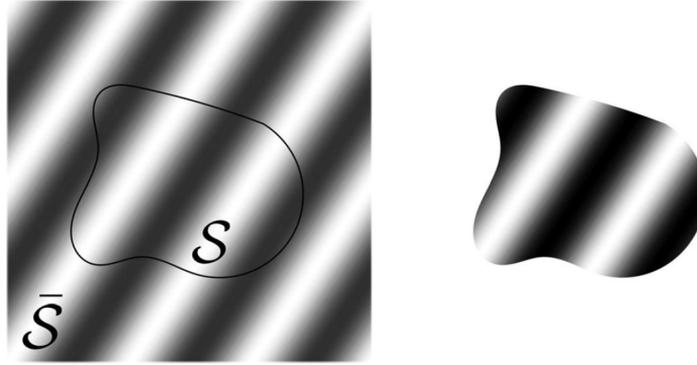


FIGURE 1.11 – Construction d'un atome du dictionnaire - Gauche : Contour de la plaque dans le domaine rectangulaire $\bar{\mathcal{S}}$ utilisé pour calculer la base d'ondes planes - Droite : L'atome correspondant restreint à \mathcal{S} est inscrit dans le contour de la plaque

La différence entre les deux approches réside dans le second terme qui dans le cas présent favorise une solution parcimonieuse plutôt qu'une solution de moindre énergie dans le cas de Tikhonov. Mais contrairement à la méthode standard, le problème L1 n'a pas de solution analytique et fait appel à des algorithmes de *Basis Pursuit Denoising* (BPDN) qui permettent de résoudre des problèmes d'optimisation potentiellement lourds. Ces algorithmes ne sont pas discutés ici, ils sont facilement accessibles [36, 37] et nous en avons utilisé plusieurs variantes pour obtenir les résultats présentés plus loin.

1.4.3 Conception d'un dictionnaire générique

De fait la partie la plus critique des méthodes inverses fondées sur la parcimonie est la définition d'un dictionnaire adapté. Dans le cas de la NAH plane il doit aussi ne pas être trop spécifique de la structure étudiée.

Pour notre étude, nous avons considéré des plaques minces de forme arbitraire excitées au marteau automatique et dont on mesure la réponse impulsionnelle acoustique proche avec un réseau de microphones. Le dictionnaire adapté à une représentation parcimonieuse de telles structures est naturellement la collection de ses déformées modales. Or c'est précisément ce que la NAH cherche à identifier. Il est donc nécessaire de disposer d'un dictionnaire plus générique. Des résultats théoriques [38] établissent que la décomposition en onde plane permet d'obtenir de bonnes approximations des solutions de l'équation de Helmholtz pour des plaques de forme convexe quelles que soient les conditions aux limites. Ce concept étendu aux plaques minces homogènes [39] nous a permis de concevoir un dictionnaire adapté. On considère que l'onde de flexion de la plaque située dans le plan (x, y) peut être approchée par une somme d'ondes planes. On écrit alors mathématiquement la distribution de vitesse normale, solution à l'équation de Kirschhoff-Love comme :

$$\dot{\mathbf{w}} \approx \left(\sum_n a_n e^{j\bar{k}_n \bar{x}} \right) \mathbf{1}_{\mathcal{S}}(x, y) \quad (1.17)$$

où $\mathbf{1}_{\mathcal{S}}(x, y)$ est l'opérateur qui restreint les ondes planes au domaine \mathcal{S} inscrit dans les limites de la plaque. La figure 1.11, décrit l'opération de calcul d'un atome du dictionnaire. La résolution du spectre spatial du dictionnaire est choisie arbitrairement. Dans notre étude on a considéré que la longueur d'onde maximum des atomes vaut 2 fois la longueur caractéristique de la plaque. La longueur d'onde minimum est déterminée par l'échantillonnage spatial de la reconstruction.

Pour sa validation ce dictionnaire a été utilisé pour reconstruire les déformées vibratoires opérationnelles (ODS) d'une plaque rectangulaire mesurées au vibromètre laser sur une large bande de fréquence. Pour contrôler la parcimonie du problème, on a utilisé un algorithme itératif *Orthogonal Matching Pursuit* (OMP)[40]. On présentera plus en détail cet algorithme au chapitre suivant. Avec ce dictionnaire on est finalement parvenu à reconstruire toutes les ODS sur la bande utile avec une fidélité supérieure à 86% et 8 atomes pour chacune.

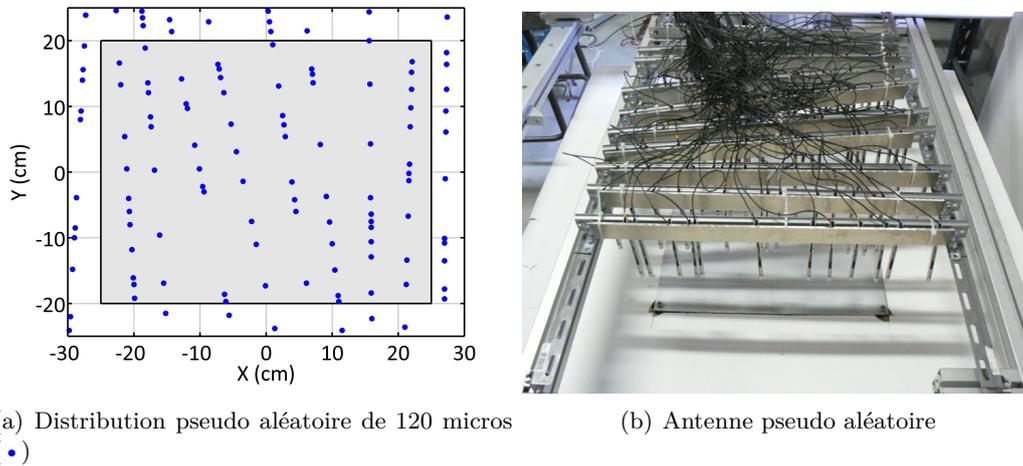


FIGURE 1.12 – Dispositif pour l'holographie compressée

1.4.4 Réduire l'échantillonnage

Dans le cadre de la NAH nous avons donc introduit le principe de parcimonie et décrit sa capacité intrinsèque de régularisation. Cependant aucune simplification n'est encore apportée au dispositif expérimental. Or des théories récentes ont montré que la formulation parcimonieuse permet parfois la réduction significative du nombre de mesures nécessaire à une reconstruction sinon exacte, au moins approchée avec une bonne précision, en dépassant le théorème d'échantillonnage de Shannon. Ces théories sont regroupées sous l'appellation *Compressive Sampling* ou *Compressed sensing (CS)*[41].

D'un point de vue formel, le CS consiste premièrement à réduire le nombre de mesures, ce qui amène le système linéaire $\mathbf{p} \approx \mathbf{H}\hat{\mathbf{w}} = \mathbf{H}\mathbf{D}\alpha$ à avoir beaucoup plus d'inconnues que d'équations, deuxièmement à exploiter la parcimonie de la source avec le dictionnaire \mathbf{D} en reconstruisant $\hat{\mathbf{w}}$ par régularisation parcimonieuse.

Dans le cas général, on a donc un système linéaire associé à la matrice $\mathbf{A} = \mathbf{H}\mathbf{D}$ qui est sous-déterminé, pour lequel le nombre de solutions est théoriquement infini et la seule connaissance de la mesure \mathbf{p} n'est pas suffisante pour identifier la source $\hat{\mathbf{w}}$. Or il apparait qu'à certaines conditions mathématiques sur la matrice \mathbf{A} , on peut identifier la source si elle est suffisamment *sparse* dans \mathbf{D} . Sans nous étendre sur ces conditions, on peut retenir qu'elles imposent une certaine incohérence entre l'ensemble de mesures \mathbf{p} et l'opérateur de reconstruction \mathbf{A} . On peut réaliser cette condition d'incohérence assez simplement, en prélevant un nombre réduit d'échantillons de pression suivant une distribution aléatoire dans l'espace.

La mise en œuvre de l'échantillonnage compressé demande donc l'usage d'une antenne dont la distribution aléatoire doit être figée pour la construction. Pour décider d'une forme d'antenne dédiée, nous avons mené une étude par simulation numérique. Pour une antenne de 120 microphones, le meilleur compromis entre qualité des reconstructions et contraintes de fabrication est obtenu avec une antenne constituée de 10 barres obliques. Pour chaque barre rectiligne, l'orientation et la distribution des 12 micros sont aléatoires. Cette antenne est présentée par la figure 1.12.

1.4.5 Résultats expérimentaux

Pour évaluer les performances de la technique L1, on compare quelques déformées opérationnelles (ODS) réelles mesurées au vibromètre laser (GroundTruth) à des reconstructions par NAH standard d'une part et à des approximations parcimonieuses mettant en œuvre plusieurs types d'antennes :

- 120 ou 1920 micros distribués régulièrement (c.f. fig.1.3) (REG 120 et 1920)
- 120 ou 42 micros tirés aléatoirement dans la précédente (RANfREG 120 et 42)
- 120 ou 42 micros en distribution pseudo-aléatoire (RAN 120 et 42)

Dans un premier temps on a étudié les ODS résonantes d'une plaque de dural rectangulaire (0.4×0.5 m) à bords libres. Les ODS choisies sont comprises entre 50 Hz et 3500 Hz. Les estimations $\hat{\mathbf{w}}$ obtenues par les diverses méthodes de NAH (L1 et Tikhonov) sont comparées à la 'vérité terrain' $\mathbf{\hat{w}}$. Ces résultats sont présentés et commentés en annexe B.

Ils établissent que l'approche classique du filtre de Tikhonov n'est efficace ni aux basses fréquences parce que le filtrage passe-bas des nombres d'onde est trop sévère, ni en haute fréquence ou l'échantillonnage spatial ne respecte plus le théorème de Shannon introduisant des effets de recouvrement spectral.

La méthode L1 en revanche s'avère fidèle sur toute la gamme de fréquence même avec un nombre réduit de microphones, à condition que ceux-ci soient circonscrits à la plaque (suffixe 'in' sur la figure). Noter qu'avec 120 micros, l'utilisation de l'antenne pseudo-aléatoire n'apporte pas de bénéfice particulier par rapport à un tirage aléatoire de 120 microphones parmi l'ensemble régulier à 1920 points.

Pour établir le caractère générique du dictionnaire d'ondes planes défini en §1.4.3, il faut le confronter à des structures de géométrie plane arbitraire, mais respectant la propriété de convexité du domaine. Nous avons donc soumis la technique L1 à l'épreuve d'une plaque circulaire tronquée en acier. Quelques ODS pertinentes estimées par minimisation ℓ_1 , dans la bande [100 Hz - 3 kHz], comparées à une mesure vibrométrique directe, sont présentées sur la figure 1.13. Des conclusions identiques au cas de la plaque rectangulaire peuvent être tirées. Cependant la parcimonie des déformées opérationnelles est moins grande pour ce contour en D et un plus grand nombre de mesures est nécessaire pour les reconstruire avec une bonne fidélité ($C > 80\%$).

On peut noter que la tolérance de la technique L1 vis-à-vis du choix du paramètre de régularisation ϵ est assez grande. Ce paramètre qui évalue le rapport signal à bruit de la mesure exige cependant de définir une méthode objective de détermination.

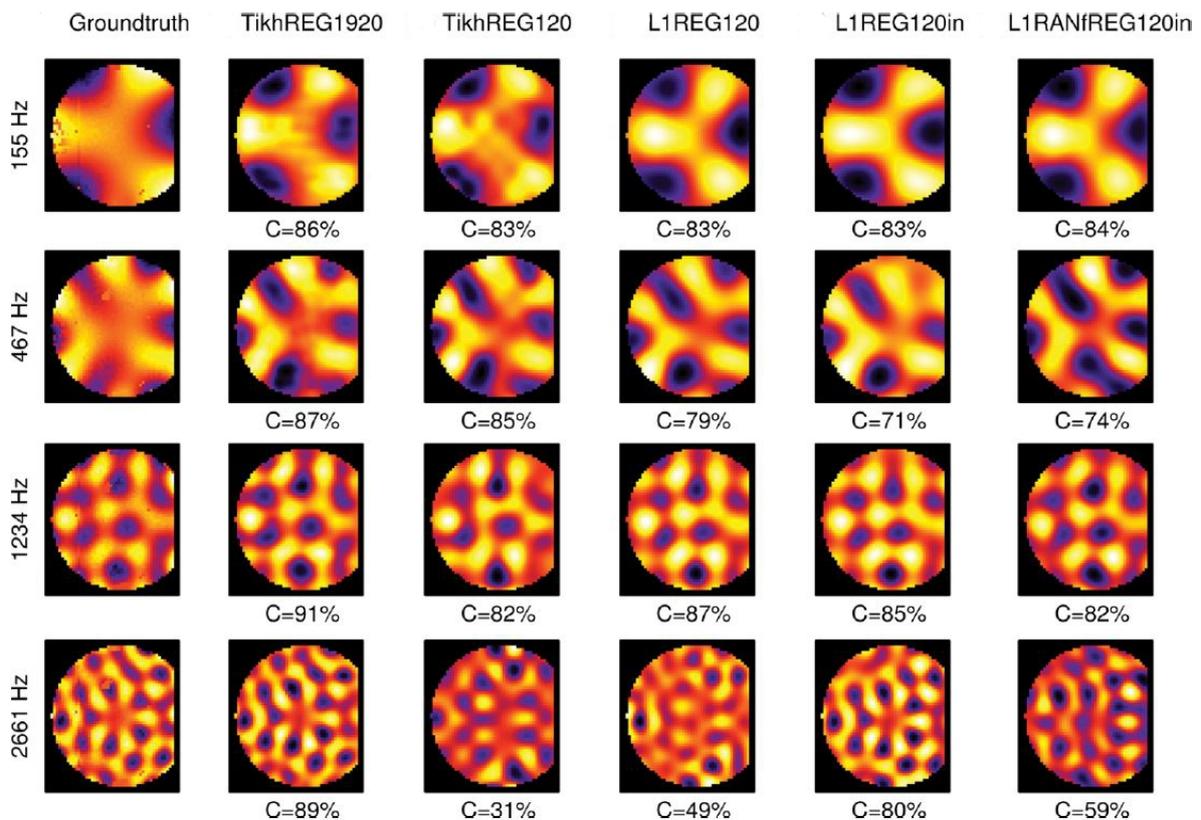


FIGURE 1.13 – Reconstructions par NAH sparse (L1) et standard (Tikh.) des ODS d'une plaque d'Acier circulaire tronquée - Comparaison à une mesure directe au vibromètre laser (Groundtruth)

1.4.6 Bilan de l’holographie compressée

Pour conclure sur l’holographie compressée, on peut énumérer les améliorations apportées par la méthode conjointe de régularisation parcimonieuse et d’échantillonnage compressé et constater d’abord qu’elle traite deux questions essentielles dans le cadre d’une seule théorie.

Contrairement à la méthode standard, on peut noter que la méthode parcimonieuse est reste efficace en présence d’éventuelles erreurs limitées de calibration des microphones. Cela provient du fait que la solution approchée est une combinaison linéaire d’éléments choisis dans un dictionnaire déterministe.

Avec la méthode classique, il est nécessaire que l’hologramme soit enregistré sur une étendue plus grande que la source à reconstruire afin d’en recueillir le rayonnement complet. Cette contrainte augmente le nombre de mesures nécessaires. La méthode *sparse* au contraire ne considère que les microphones inscrits dans les limites de la structure.

Alors que le filtrage de Tikhonov évacue les hautes composantes spatiales du rayonnement, interdisant la reconstruction des discontinuités de la source, le dictionnaire parcimonieux les intègre et permet en particulier d’observer la vibration à forte amplitude au niveau des bords libres.

Pour éviter les artéfacts de recouvrement spectral, l’hologramme standard doit être échantillonné en assurant le respect du théorème de Shannon. Cela demande de connaître *a priori* les longueurs d’ondes les plus courtes des ODS à reconstruire, et de réaliser la mesure avec une densité adaptée potentiellement grande et coûteuse. La méthode parcimonieuse, associée aux principes de l’échantillonnage compressé, au contraire, permet des reconstructions fidèles avec un nombre très réduit de mesures même pour les ODS à hautes fréquences spatiales.

Un inconvénient cependant ternit le tableau de la méthode parcimonieuse : les algorithmes qu’elle utilise pour sélectionner les quelques atomes entrant dans la reconstruction de la source sont sensiblement plus dispendieux en terme de ressources numériques. Ce handicap devrait se réduire à terme en bénéficiant de méthodes de calcul à haute performance [42] et de la vitesse croissante des processeurs.

1.5 Perspectives pour l’holographie acoustique de champ proche

Si l’on se limite à l’étude de structures planes et à la reconstruction de déformées opérationnelles, on peut considérer que la méthode d’holographie impulsionnelle a atteint une certaine maturité avec l’holographie compressée. Cependant le caractère plan des objets étudié est très restrictif. La méthode standard basée sur un algorithme de transformée de Fourier rapide devra être étendue à l’étude des structures 3D. Pour ce faire, et à supposer que le rayonnement acoustique soit assez puissant, la méthode inverse de rayonnement par éléments de frontière (IBEM) pourrait être appliquée. Sa formulation est en bonne adéquation avec le formalisme de l’échantillonnage compressé. Le challenge de cette évolution résidera vraisemblablement dans la définition d’un dictionnaire générique ou plus spécifiquement conforme à l’objet étudié.

Une autre limite à notre méthode est que son résultat est généralement restreint à l’identification des déformées opérationnelles aux fréquences de résonance de la structure. Or une analyse modale complète repose sur la connaissance de ces déformées à toutes les fréquences dans une bande donnée pour en extraire une base modale complète ainsi que les masses, rigidités et amortissements associés. Cette limite était due initialement à la faible dynamique de la mesure acoustique qui rendait la NAH inefficace à bas niveau. Or l’accès à un équipement plus performant dans le cadre du projet M μ , avec des microphones MEMs de plus grandes sensibilité et dynamique, permet d’envisager l’acquisition d’hologrammes exploitables sur toute la bande utile. On peut même envisager de s’affranchir de l’identification vibratoire et de réaliser l’analyse modale directement à partir de l’hologramme. Cette réflexion est déjà entamée et les premières formulations ont fait l’objet d’un projet de Master. L’objectif est d’adapter les algorithmes d’analyse modale existants en y intégrant le processus holographique éventuellement compressé.

Dans la suite des travaux sur l’imagerie acoustique en temps réel qui sont décrits au chapitre suivant, on envisage naturellement de profiter du calcul parallèle rapide pour donner à

l'holographie la capacité d'observation de déformées opérationnelles en temps réel. On pourra s'appuyer sur des études qui ont déjà exploré la piste du temps réel sur le plan théorique [43]. Cette capacité donnerait l'accès à l'étude de phénomènes vibratoires instationnaires, à l'analyse modale opérationnelle en temps réel ou encore à l'identification des sources des vibrations [44] en temps réel.

1.6 Autres études et projets en dynamique des structures

1.6.1 Contributions au contrôle de la vibration des structures

La technique d'holographie ou son outil de validation, la vibrométrie laser ont été sollicitées dans le cadre de plusieurs recherches en vibration des structures et en particulier pour des applications en contrôle des vibrations actif et passif. Notre contribution à ces recherches concernent essentiellement l'expertise dans la mesure vibroacoustique.

Contrôle passif du rayonnement acoustique

La thèse de Giuseppe Rossi (Dir. J.Pouget) Cette thèse avait pour objet la réduction du rayonnement acoustique des structures minces par un réseau piézoélectrique passif. Une stratégie de contrôle localisé a notamment été mise au point qui utilise un réseau d'actionneurs positionnés en des endroits optimisés, et un circuit électrique conçu pour concentrer l'effort de contrôle dans la réduction de la puissance acoustique rayonnée. La NAH et la vibrométrie laser ont été mises à contribution pour l'étude expérimentale de l'optimisation d'une structure intelligente localisée. Les résultats de cette étude sont présentés dans l'article [45].

Contrôle actif de tables d'harmonie

Le projet ANR-IMAREV piloté à l'IRCAM par A. Mamou-Mani, cherche à concevoir de nouveaux instruments de musique grâce au contrôle actif. Le principe, basé sur l'utilisation d'instruments acoustiques contrôlés par rétroaction active, vise à étendre les possibilités sonores des instruments. Le son hybride résultant provient de la superposition de la vibration mécanique et de son traitement numérique. Dans ce projet, le cœur du travail de thèse de S. Bennacchio (Dir. J. Frelat et A. Mamou-Mani) est de mettre au point des modèles, des algorithmes et des systèmes de contrôle pour créer un instrument actif optimisé à table d'harmonie. Il se fonde sur le contrôle actif modal qui agit directement sur les paramètres de la base des modes propres de vibration de la table. Un instrument à corde simplifié a été construit. Il est constitué d'une corde en acier tendu et d'une table d'harmonie rectangulaire en épicéa encastrée sur tout son contour, reliés par un petit chevalet de bois.

Nous sommes intervenus pour mettre en œuvre l'analyse modale de la table d'harmonie par vibrométrie laser. Cette analyse a permis l'identification des paramètres modaux en fonction notamment de la tension de la corde. À partir de ces résultats un système de contrôle modal a pu être conçu et implémenté. Ce système de contrôle a été validé d'abord par simulation puis par une nouvelle analyse modale. Les résultats de cette étude sont rapportés dans l'article soumis [46].

1.6.2 Couplage Vibro-Acoustique numérique

Un sujet nouveau nous préoccupe autour des instruments de musique fondés sur le transfert vibroacoustique. Il est complémentaire des différentes recherches impliquant les tables d'harmonie la NAH et la modélisation des vibrations par éléments finis. Cette recherche naissante vise, à terme, à établir une nouvelle connexion entre la description objective de l'instrument de musique et de son rayonnement et le jugement perceptif que peut en avoir l'artiste qui le joue ou l'auditoire.

La *Split Guitar* Les premiers travaux dans cette voie ont été suscités par le dépôt récent d'un brevet sur le concept de la *Split Guitar* par C.Besnainou et J. Frelat, chercheurs à *∂'Alembert*. Ils impliquent également Sylvie Le Moyne et Julien Colmars.

Ce concept à l'origine part du constat que le rayonnement de la guitare acoustique moderne ou classique n'est pas suffisamment puissant pour lui permettre de prendre part aux performances d'un orchestre classique, le son de la guitare étant masqué par les autres instruments. La *Split Guitar* veut remédier à ce handicap en modifiant la configuration mécanique de l'instrument. Les modifications sont d'ordre structurel et affectent en particulier la conception de la table d'harmonie.

La table est ainsi fabriquée d'un seul tenant à partir de matériaux composites en fibre de carbone et un cintrage permanent impliquant des contraintes résiduelles lui est imposé. Cette conception modifie notablement la table en comparaison de celles en épicea des guitares classiques qui se caractérisent par leur orthotropie.

La seconde opération donne son titre au concept. Elle consiste à fendre la table d'harmonie de la rosace à la base mais en conservant les deux parties solidaires dans la partie supérieure mais aussi par l'intermédiaire du chevalet. De plus la distribution de masse est différente de part et d'autre de la fente. Le but de ces opérations est d'augmenter la densité modale de la table, de rendre son spectre plus homogène et d'éliminer partiellement les modes symétriques réputés non rayonnants pour finalement augmenter la puissance globale de rayonnement.

Les premières preuves de concept ont été exprimées par des instrumentistes qui ont reconnu au jeu de l'instrument une puissance effectivement plus importante. Mais cet avis subjectif n'est pas quantifié.

Nous avons donc entrepris une étude objective sur deux fronts. D'une part un modèle par éléments finis d'une structure simplifiée mettant en œuvre le concept de la guitare fendue est en cours de développement. Il devrait permettre d'établir ou d'infirmier l'enrichissement spectral apporté par la fente. Parallèlement on travaille à l'adaptation d'un code de rayonnement par éléments de frontières afin d'exploiter les champs vibratoires déterminés par le modèle EF pour calculer des indicateurs pertinents du rayonnement global ou local.

D'autre part des guitares de concert et une *Split Guitar* en matériau composite ont été soumises à une expérience de NAH. L'hologramme donnera lieu à deux études : la résolution du problème inverse permettra l'identification modale, alors qu'un calcul direct permettra d'extraire le champ rayonné. Les premiers résultats de ce versant expérimental présentés [47] sont en cours d'analyse.

Chapitre 2

Imagerie et localisation des sources acoustiques

Introduction

Le diagnostic acoustique pratiqué par les bureaux d'étude spécialisés utilise le sonomètre qui évalue localement les caractéristiques spectrales et des indicateurs statistiques du champ acoustique. Les instruments et protocoles de mesure mis en œuvre sont clairement définis par des normes et cette technique normalisée permet un constat quantifié du niveau sonore en un point donné de l'espace.

Mais ce constat ne donne aucune information sur la nature de la source du son, si ce n'est sur son spectre. Dans la perspective de réduire le bruit et dans le but d'identifier l'objet ou le phénomène à la source du champ sonore, il faut déployer des appareils de mesure plus évolués et concevoir des méthodes d'analyse adaptées. Les appareils en question mettent en œuvre des antennes de microphones associés à des systèmes d'acquisition que les progrès technologiques récents promettent de rendre, à moyen terme, largement accessible aux opérateurs industriels et aux bureaux d'études en acoustique.

Dans ce cadre l'équipe d'acoustique de ∂ 'Alembert a investi une grande partie de son activité de recherche au développement des moyens instrumentaux contribuant aux progrès des méthodes les plus avancées en imagerie acoustique.

L'expérience historique du laboratoire dans la conception des réseaux de phase pour l'imagerie ultrasonore active a permis de s'intéresser aux moyens d'imagerie passive et large bande dans le domaine audible. Les principes physiques régissant le design des antennes ont été transposés des réseaux de transducteurs piézo-électriques 1D aux antennes de microphones 2D.

Ce chapitre rappelle pour commencer les principes de conception des antennes de microphone pour définir des distributions de récepteurs qui assure une dynamique optimale pour l'imagerie.

Trois cas d'étude basés sur la méthode inverse classique de formation de voies ("*Standard Beamforming*" (SBF)) sont ensuite présentés. Des modes d'analyse évolués du champ télédétekté sont proposées dont l'un est mis en œuvre en temps réel, grâce à des technologies récentes.

La dernière section de ce chapitre retrouve le cadre du projet ECHANGE déjà évoqué pour l'holographie. Elle présente une autre partie de la thèse d'Antoine Peillot [33] qui utilise les mêmes systèmes d'enregistrement. Nous avons proposé de nouvelles méthodes inverses pour la localisation des sources fondées sur leur modélisation parcimonieuse, qui comblent certaines lacunes des méthodes classiques.

2.1 Mise en œuvre de la formation de voies standard

En imagerie acoustique audible standard, on cherche généralement à localiser des sources dans une scène bruyante. La scène en question, lieu de l'image, est figurée par un maillage plan. Une antenne de microphones située à distance et parallèlement observe la scène passivement (c.f. figure 2.1). Les signaux reçus aux microphones sont ensuite combinés numériquement dans un

problème inverse pour former une image de la distribution de pression dans la scène observée. Les formulations classiques du problème inverse seront décrites plus loin.

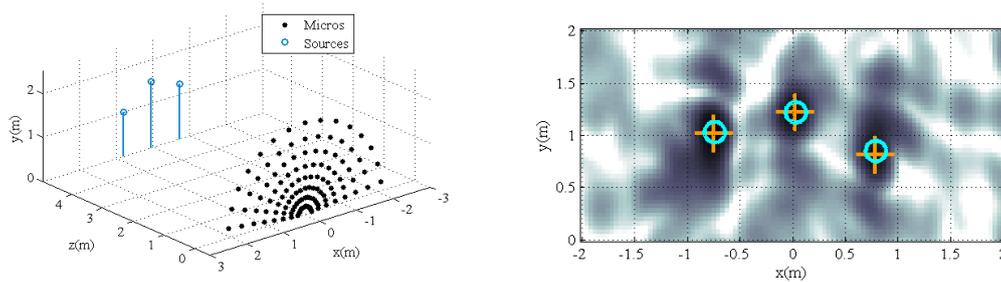


FIGURE 2.1 – Scénario standard d'imagerie acoustique par formation de voies : Disposition antenne/plan source (gauche) - Carte SPL typique reconstruite dans le plan source (droite)

2.1.1 Principes de conception des antennes acoustiques

Quelle que soit la formulation choisie pour le problème inverse, les performances de l'antenne de microphones sont limitées par des contraintes physiques bien connues et décrites explicitement par la théorie de la diffraction des ouvertures commune à l'optique et à l'acoustique [48]. Brièvement, cette théorie physique permet réduire à 2 paramètres les indicateurs de performance des antennes acoustiques : la directivité associée au pouvoir de résolution et la dynamique qui indique la capacité à séparer des sources de niveau différent. Ces indicateurs sont mesurables sur le diagramme de rayonnement de l'antenne en champ lointain. Par réciprocity en effet, on peut confondre le diagramme de sensibilité d'une antenne réceptrice avec le diagramme de rayonnement de son émetteur dual. Suivant l'approximation de Fraunhofer, le diagramme de rayonnement en champ lointain se réduit à la transformée de Fourier de la distribution d'amplitude complexe mesurée aux micros de l'antenne. On parle du spectre angulaire.

Ce spectre angulaire caractérise donc le champ lointain qui intervient au delà de la distance de Fraunhofer $D_F = 2L^2/\lambda$. En champ proche (distance $< D_F$), la focalisation est possible, c'est à dire que le contrôle de la distribution de phase sur le réseau permet de faire la "mise au point" de l'image. On conserve alors les caractéristiques du spectre angulaire en les rapportant à la distance D_F .

Pouvoir de résolution

Ainsi pour une distribution d'amplitude uniforme, le pouvoir de résolution angulaire, mesuré par la largeur à -3 dB du lobe principal du diagramme de rayonnement, dépend directement de la fréquence f (*i.e.* de la longueur d'onde $\lambda = c/f$) et de la dimension L de l'antenne : $\theta_{-3dB} = \lambda/L$.

L'objectif étant détecter des sources dans une large bande de fréquence, un compromis s'impose pour le choix de la résolution à la fréquence la plus basse. D'un point de vue pratique, le nombre de microphones disponibles et l'encombrement du système décident généralement de la résolution.

Dynamique

La dynamique dépend de deux paramètres indépendants : le niveau de fuite spectrale ('leakage') et le niveau de repliement spectral.

La fuite spectrale correspond au niveau des lobes secondaires proches du lobe principal. Elle est déterminée par la distribution d'amplitude sur l'antenne. L'amplitude uniforme procure le cas le plus défavorable avec un niveau de -13 dB. Pour réduire le *leakage*, on peut affecter les micros d'un poids décroissant vers les bords de l'antenne. Le fenêtrage ou apodisation, largement documenté en traitement du signal, réduit le niveau des lobes secondaires au détriment de la résolution en élargissant le lobe principal. On choisit la fenêtre de pondération selon l'application en fonction du compromis *leakage*/résolution. On peut aussi pondérer les microphones en

adoptant une distribution non uniforme. Mais étant donné le nombre généralement réduit de microphones, la densité relativement faible de la distribution rend cette solution difficilement contrôlable.

De fait la maîtrise du repliement spectral ('*aliasing*') est plus déterminante pour une imagerie avec une bonne dynamique. L'*aliasing* se traduit, comme le terme l'indique, par l'apparition de sources fantômes à des niveaux proches de celui de la source principale. Ces alias sont captés dans les directions des lobes de réseau, lieux d'interférences constructives parasites. Ce phénomène est directement lié au caractère discret de l'antenne et à la régularité de son échantillonnage. Il survient, conformément au théorème de Shannon, dès que la longueur d'onde du champ acoustique mesuré est inférieure à 2 fois la distance d entre les micros ($d > \lambda/2$). La position angulaire des 'alias' est donnée alors par : $\theta_{alias} = \lambda/d$.

Comme on dispose généralement d'un nombre limité de microphones, les dimensions d'une antenne régulière et/ou sa fréquence maximum de travail sont rapidement limitées et l'existence des lobes de réseaux est inévitable. Mais on peut mettre en œuvre des stratégies d'optimisation qui limitent le niveau des lobes secondaires de réseau en réduisant le caractère régulier de la distribution discrète.

La distribution naturellement irrégulière est la distribution aléatoire. Pourvu qu'elle soit contrainte à couvrir une étendue assurant la résolution attendue, elle permet de réduire sensiblement le niveau des lobes de réseaux qui dans la plus mauvaise configuration est du niveau du lobe principal. La dynamique accessible dépend du nombre N de micros disponibles. Elle croît avec la densité $D = N/S$ du réseau (S : Surface de l'antenne). On peut montrer numériquement que la dynamique exprimée en décibels décroît linéairement avec la distance apparente entre les micros $\tilde{d} = 1/\sqrt{D}$.

Pour des raisons pratiques, on utilise généralement une antenne avec un nombre de microphones fixé et une forme constante. On peut alors transposer le résultat précédent en choisissant une configuration qui procure une dynamique optimale de l'ordre de 15 à 18 dB à la fréquence de coupure $f_c = c/2\tilde{d}$. On sait alors que la dynamique décroît quand la fréquence d'observation augmente.

Cependant pour une densité donnée, la dynamique optimale d'un réseau à distribution aléatoire n'est obtenue que pour certains tirages. De plus ce type de distribution des micros a un inconvénient majeur en ce qu'elle rend la construction de l'antenne très complexe. Pour simplifier la configuration, on peut envisager de réduire le caractère aléatoire à des paramètres facilement contrôlables en conservant certains éléments réguliers.

Dans ce sens, nous avons mené une étude numérique pour déterminer une distribution pseudo-aléatoire optimale [49] en vue de simuler des images d'avions en vol. A cette occasion, un algorithme génétique a été développé. Le processus cherchait à obtenir le niveau de lobes secondaires le plus bas possible dans le demi espace d'observation. L'antenne devait être constituée d'anneaux portant des microphones espacés régulièrement. Les variables d'optimisation consistaient en un couple (rayon, rotation) pour chaque anneau. L'algorithme génétique produit plusieurs configurations offrant une dynamique théorique optimale.

Cependant nous avons constaté que certaines configurations retenues étaient très peu éloignées du réseau déterministe régulier dont la densité décroît vers les bords. Nous en avons déduit que cette dernière caractéristique est décisive pour diminuer sensiblement le niveau des interférences parasites, l'ajout d'une faible irrégularité pouvant contribuer aussi à cet objectif. Ce principe a été utilisé par la suite pour construire deux antennes dédiées aux applications d'imagerie décrites dans la section suivante.

2.2 Applications

2.2.1 Imagerie et analyse dynamique du bruit de roulement

Le projet Predit REBECA (2005-2008) avait pour but d'étudier les bruits rayonnés à l'extérieur des véhicules automobiles. Pour ce projet, nous avons conçu et validé expérimentalement une antenne de 120 micros dans le but d'étudier en particulier le bruit de roulement engendré par le contact pneu-chaussée. L'antenne couvre un demi disque de 4 m de diamètre. Elle est

composée de 15 branches disposées en queue de paon, avec un pas angulaire régulier de 12° . On profite de la réflexion sur le sol considéré comme un miroir parfait pour compléter l'antenne à un disque. Cet antenne virtuelle dispose d'une résolution de 6° à 1 kHz. On tolère une régularité angulaire de la distribution qui provoque de l'*aliasing*. Pour réduire le niveau des lobes de réseaux, on distribue les microphones irrégulièrement sur les rayons suivant une progression géométrique.

La dynamique théorique obtenue par cette antenne est de 15 dB. Le diagramme de rayonnement à 1 kHz dans le demi espace frontal et sa moyenne par rotation autour de l'axe de l'antenne sont présentés sur la figure 2.2.

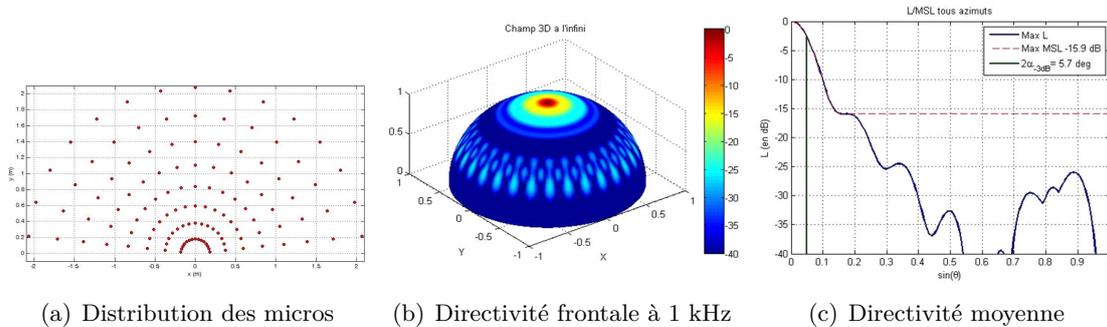


FIGURE 2.2 – Description de l'antenne du projet Rebeca

Évaluée d'abord par simulations numériques sur des scénarios bien contrôlés, cette antenne a été construite et confrontée expérimentalement aux mêmes scénarios. La dynamique expérimentale s'est avéré meilleure que celle théorique malgré un environnement réel acoustiquement peu favorable et en particulier très réverbérant.

Pour caractériser le bruit de roulement, le système a été installé dans la chambre semi-anéchoïque du CEVAA (cf. figure 2.3 (gauche)). Une automobile était placée, moteur coupé, le train avant sur un banc à rouleau. L'antenne REBECA disposée à une distance de 2 m environ a permis d'enregistrer le champ acoustique émis au point de contact pneu-rouleau, pour des vitesses stationnaires (50 et 100 km/h) et des phases d'accélération. Ces enregistrements échantillonnés à 125 kHz ont été post-traités suivant deux méthodes distinctes : la formation de voies standard sur une base harmonique et la formation de voies temporelle pour une analyse en composantes principales dans le domaine temps-espace[50].

La formation de voies standard (cf figure 2.3 (droite)) permet de localiser sans équivoque la source du bruit de roulement au point de contact roue-sol. On remarque cependant que cette source n'est pas de même nature, en niveau comme en forme, à 50 et 100 km/h. A 50 km/h en effet, plus qu'à 100 km/h, l'arrière de la roue semble être le siège d'une concentration importante d'énergie acoustique.

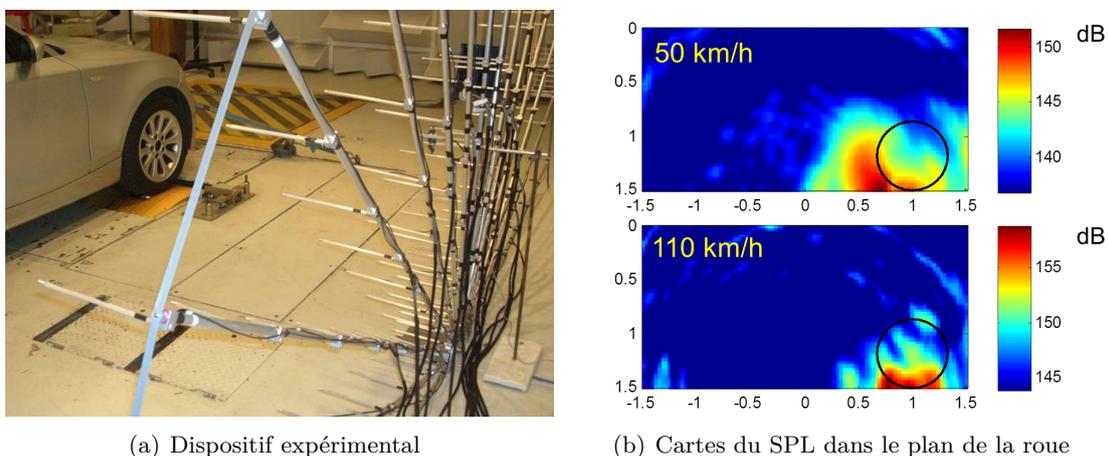


FIGURE 2.3 – Expérience d'analyse du bruit de roulement par formation de voies

Pour analyser l'évolution dynamique du phénomène, et à terme le caractériser dans une phase instationnaire (accélération par exemple), on peut mettre en œuvre des outils mathématiques complémentaires au beamforming telle l'analyse en composante principale (PCA). Le beamforming est alors réalisé dans le domaine temporel. La pression acoustique en un point du champ est la somme des signaux microphoniques, chaque signal étant retardé du temps de propagation entre le point image et le micro. On peut ainsi constituer une image à chaque pas de temps de l'enregistrement. On considère ensuite une séquence d'images successives qui peut être l'objet d'une PCA.

La figure 2.4 présente le résultat d'une telle analyse. La PCA permet d'isoler des composantes spatiales du champ acoustique (ligne 2), d'analyser leur spectre (ligne 4) pour identifier des directions privilégiées de propagation par exemple et de suivre leur évolution temporelle sur la durée de la trame analysée (ligne 3).

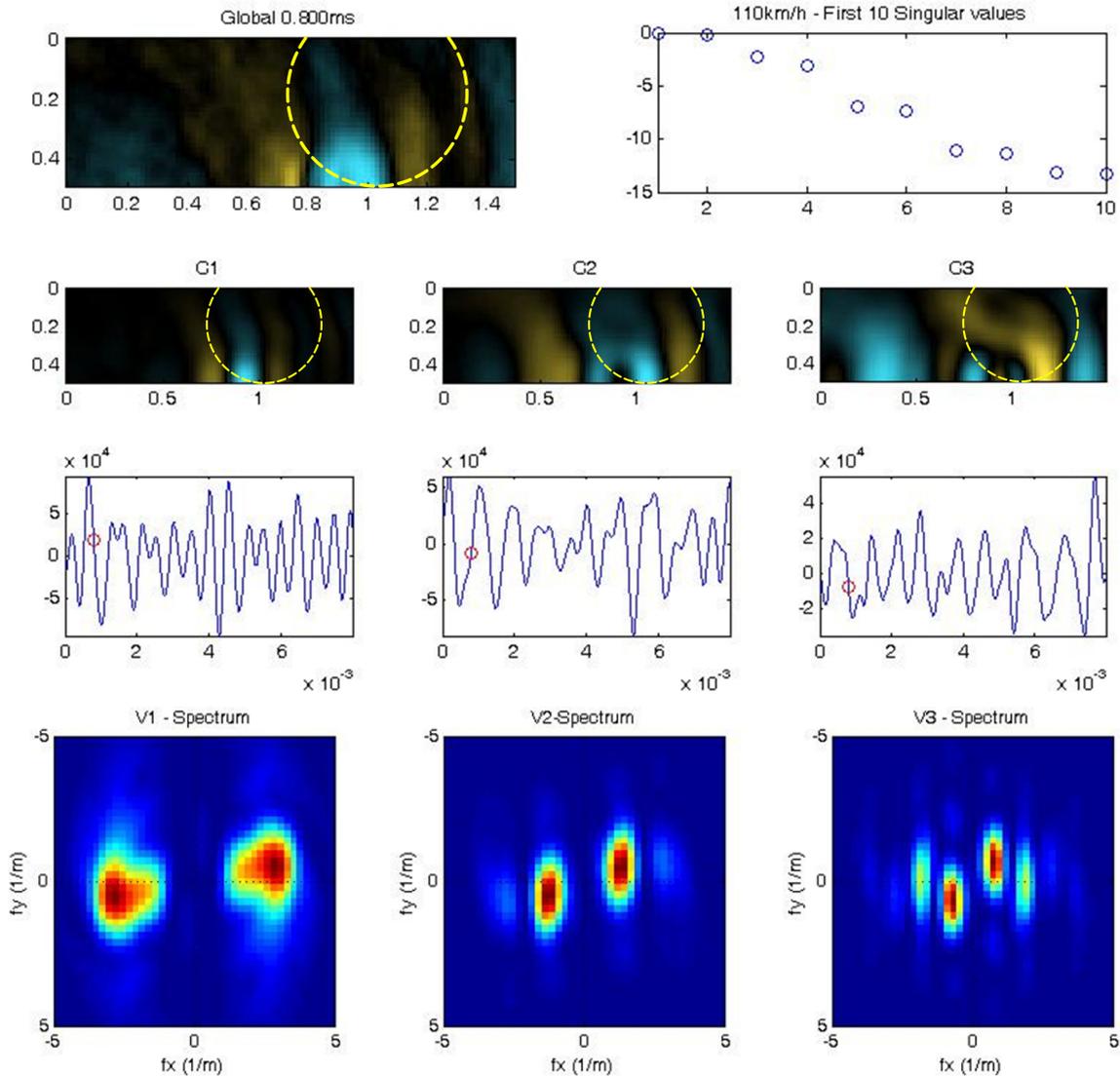


FIGURE 2.4 – Analyse en composantes principales (PC) du bruit de roulement à 100 km/h - Ligne 1 : Distribution de pression instantanée dans le plan de la roue (gauche) ; Valeurs relatives des PC sur 1 ms (droite) - Ligne 2 : Trois 1ères PC - Ligne 3 : Evolution temporelle des PC - Ligne 3 : Spectre spatial des PC

Ces résultats manquent encore de l'interprétation physique du phénomène qu'il faudra mener. La méthode d'analyse fournit pour cela de nombreux éléments susceptibles de caractériser objectivement des sources stationnaires ou non. Dans cette perspective, un enjeu important sera la capacité à produire des indicateurs en temps réel pour l'aide au diagnostic. Le projet décrit au paragraphe suivant apporte les premières réponses à ce défi.

2.2.2 La SonoCam, Formation de voies large bande en temps réel [1]

L'application précédente montre un moyen de diagnostic acoustique via une antenne de microphones qui produit des cartographies du champ acoustique dans un plan distant où l'on sait la présence de sources. Cet outil est assez répandu dans l'industrie, celle des transports en particulier, où il est utilisé de façon assez rudimentaire. Les systèmes d'imagerie acoustique industriels fournissent généralement des cartographies dynamiques. Souvent acquis dans un souci de réduction conjointe du coût et de l'encombrement, ils ne produisent la plupart du temps que des images mono-fréquentielles avec une dynamique et une résolution très limitées. Le coût des micros de mesure et des canaux d'acquisition associés est en effet rapidement prohibitif et leur nombre est souvent réduit à quelques dizaines (typiquement 32 ou 64). Par ailleurs le niveau acoustique n'est généralement indiqué qu'en valeurs relatives en dépit du besoin souvent exprimé par les ingénieurs de connaître le niveau absolu des sources. Finalement si en l'état actuel de l'art, l'imagerie acoustique est un outil important, ses performances sont limitées par la complexité et l'encombrement matériel mais également par les ressources numériques nécessaires à un traitement de l'information plus précis.

Parallèlement en acoustique du bâtiment et des salles, les bureaux d'étude spécialisés mettent en œuvre des sonomètres (SLM : Sound Level Meter) pour mesurer divers indicateurs de la qualité de l'environnement sonore. Les procédures et les instruments de mesure sont normalisés, mais les indicateurs sont ponctuels et ne procurent pas d'information sur les sources, mis à part éventuellement leur spectre, le plus souvent représenté par octaves ou tiers d'octaves.

L'objectif du projet SonoCam est de réunir ces deux méthodes de diagnostic acoustique en un seul système de moindre complexité matérielle et capable de réaliser des calculs lourds en temps réel. La SonoCam profite du développement de deux technologies récentes : le micro MEMS numérique conçu pour la téléphonie mobile, et le processeur graphique (GPU) initialement dédié au jeu vidéo.

Le micro MEMS numérique s'avère particulièrement bien adapté à la conception d'antennes acoustiques [51] : ses performances pour la captation du son en termes de sensibilité, bande passante et directivité sont très bonnes et, toute l'électronique de conditionnement du signal étant intégrée, son encombrement est minimal. Par ailleurs fabriqué à des échelles industrielles avec une bonne homogénéité, son coût est faible. Pour être assurés de ces caractéristiques, nous avons mené une campagne de mesures dans la chambre anéchoïque du Laboratoire National d'Essai (LNE) à Trappes, pour 128 MEMS. Les résultats présentés en annexe sur les figures 3.12, établissent que les performances des microphones MEMS numériques sont suffisantes pour l'imagerie du son.

Le GPU (Graphic Processing Unit) pour sa part, également peu coûteux, est conçu pour le calcul massivement parallèle. Or les algorithmes de BF standard pour l'imagerie sont parfaitement adaptés à l'architecture parallèle. On peut donc envisager une exécution assez rapide pour de la visualisation en temps réel, comme l'ont déjà montré des études en imagerie ultrasonore [52, 53].

L'antenne de la SonoCam est composée de 128 MEMS numériques assemblés suivant les principes énoncés au §2.1.1 avec pour contrainte matérielle des faisceaux de 8 micros espacés régulièrement au pas de 17 cm (longueur des câbles de liaison numérique). Les 16 faisceaux sont disposés sur des rayons rigides montés perpendiculairement autour d'un axe central au pas angulaire régulier lui aussi de 22.5° . L'ensemble constitue un disque de près de 3 m de diamètre avec une distance apparente entre micros de l'ordre de 20 cm. Les irrégularités utiles à l'atténuation des lobes de réseau sont introduites en choisissant une distance aléatoire pour l'origine de chaque rayon. L'antenne et sa fonction de directivité en réception à 1 kHz sont représentées sur la figure 2.5. A cette fréquence la résolution angulaire est de 8° et la dynamique de 18 dB. A 8 kHz, fréquence limite choisie pour le fonctionnement du système, elles passent respectivement à 1° et 10 dB. Il faut noter que la dose très réduite d'aléa dans la distribution des micros n'améliore les performances que de façon marginale. La dynamique relativement bonne est principalement due à la densité décroissante vers les bord de l'antenne.

La fusion du sonomètre et de l'imageur acoustique vise à fournir du champ source des images en temps réel. A cette fin l'antenne de 128 MEMS utilise une interface d'acquisition numérique

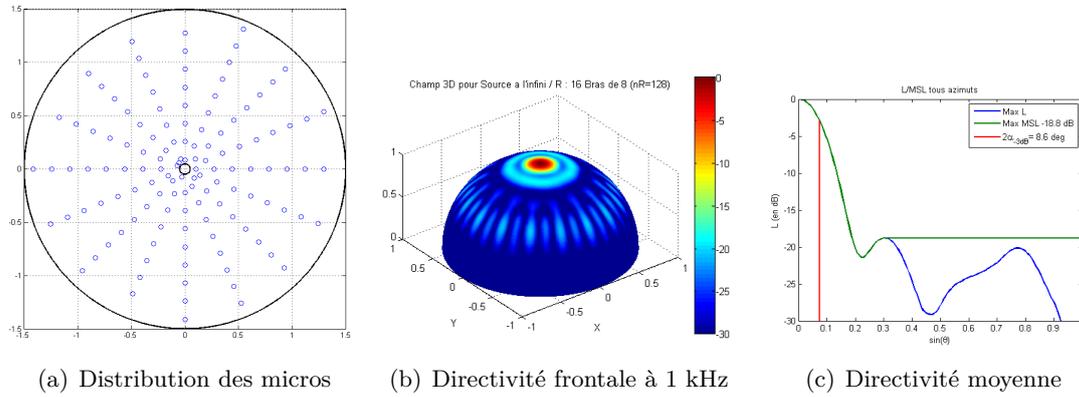


FIGURE 2.5 – Description de l’antenne de la SonoCam

conçue et développée à ∂' Alembert par Jacques Marchal et Hélène Moingeon assistés de Christian Ollivon. Cette interface permet le multiplexage des signaux numériques issus des MEMs et leur transfert à haut débit sur un PC de commande par une liaison USB2. La compacité et la simplicité connectique de l’ensemble présenté à la figure 2.6 ont considérablement simplifié le déploiement des expériences en comparaison des systèmes utilisés jusqu’alors.

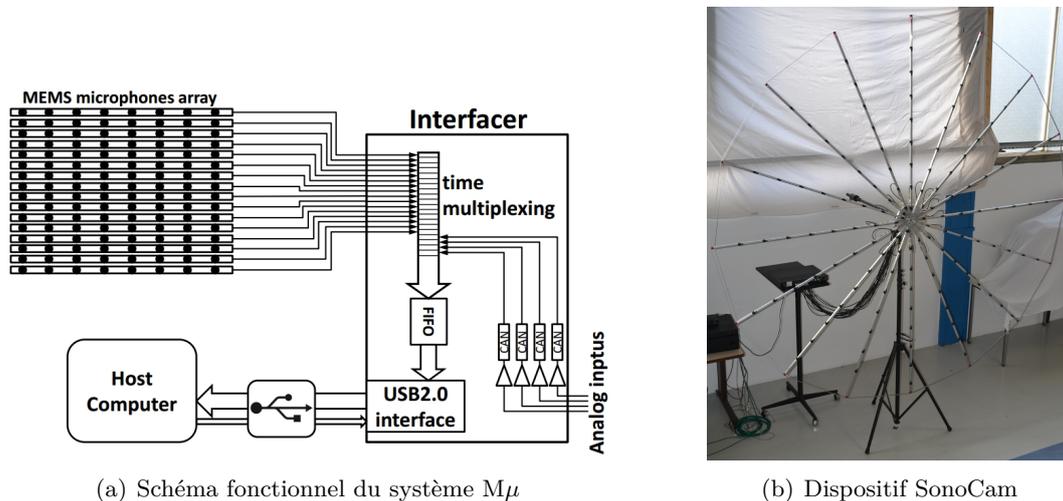


FIGURE 2.6 – Présentation de la SonoCam

Grâce à l’implémentation des algorithmes de BF standard sur le GPU, la SonoCam réalise cet objectif simultanément pour toutes les fréquences entre 50 Hz et 8 kHz. Pour synthétiser l’information, on a choisi d’adopter une représentation analogue à celle du sonomètre. Une opération numérique supplémentaire intègre le champ sur 6 bandes d’octaves entre 500 Hz et 8 kHz. L’interface avec l’opérateur présente finalement les images du champ pour ces 6 octaves avec un taux de rafraîchissement de plusieurs dizaines d’images par secondes qui donne la possibilité d’observer des phénomènes non stationnaires : sources en mouvements et sources de spectre variable par exemple.

Pour illustrer l’intérêt de cette représentation, un aspirateur domestique en fonctionnement a été soumis à la SonoCam. Un instantané de la scène est présenté figure 2.7. En basses fréquences (bandes 250 et 500 Hz) malgré une mauvaise résolution on constate que le bruit du moteur prédomine. Dans les bandes supérieures, les sources aéroacoustiques se manifestent à l’entrée d’air d’une part, et à la grille de sortie d’air au niveau du moteur d’autre part. La résolution augmentant, on parvient à distinguer 2 sources au bec d’admission dans la bande à 8 kHz. Il faut noter que les niveaux de sources indiqués en dB référencés à $20 \mu\text{Pa}$ ont été validés à l’aide d’un sonomètre. C’est à dire que la sensibilité des micros est prise en compte correctement et que l’algorithme BF implémenté utilise un modèle inverse exact.

Partant d’une base existante d’imageur harmonique en temps réel, la SonoCam, d’ores et

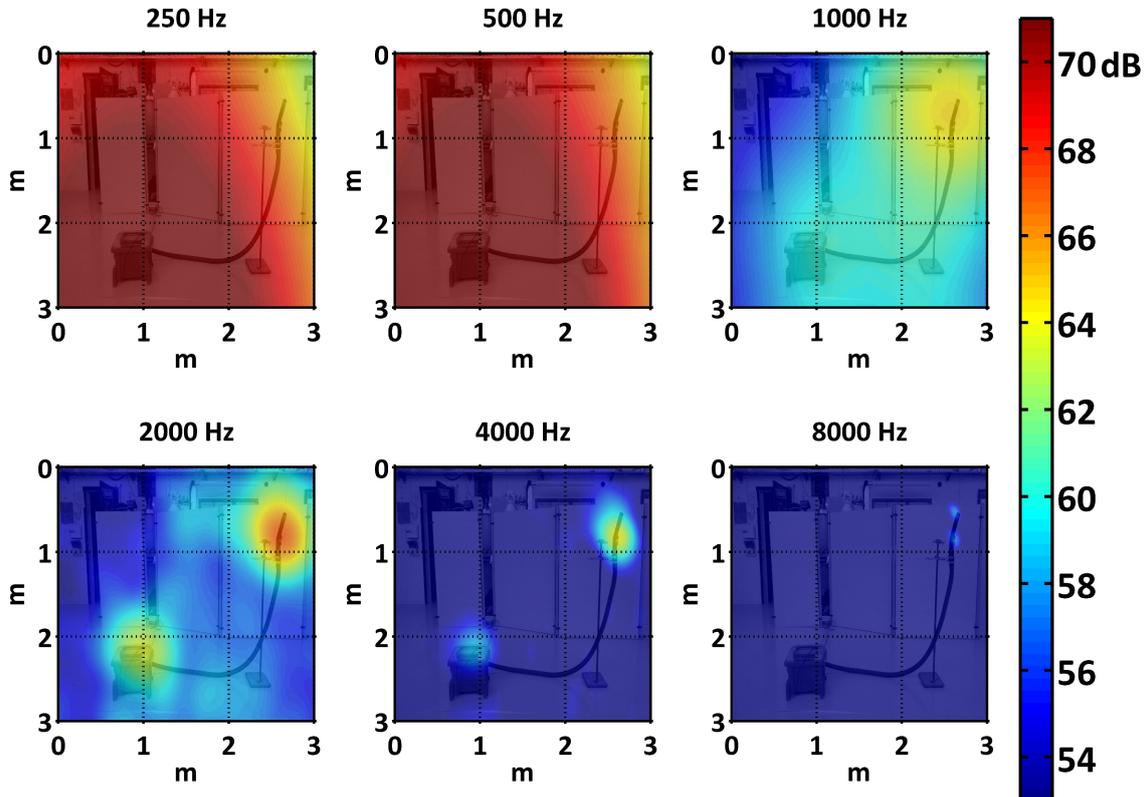


FIGURE 2.7 – La SonoCam : Vue acoustique instantanée d'un aspirateur domestique sur 6 bandes d'octave

déjà opérationnelle, a fait l'objet du stage de M2 et des premiers mois de thèse de Charles Vanwynsberghe. Les étapes suivantes ont pour objectif l'implémentation, toujours en temps réel, des méthodes à haute résolution (MUSIC, Capon, ...). Le défi qui se pose ici est le calcul et l'analyse de la matrice interspectrale des microphones, défi qui deviendra plus grand encore lorsque le nombre de micros augmentera d'un ordre de grandeur.

Ces études, en effet, constituent la phase initiale d'un projet plus vaste : $M\mu$ (MégaMicros). $M\mu$ ambitionne à terme de mettre en œuvre des systèmes acoustiques de plusieurs milliers de microphones. Ce qui soulève des problèmes de conception et développement technologiques non triviaux et en passe de trouver leur solution. D'autres problèmes enthousiasmant posé par $MUmu$ concernent la transposition à grande échelle d'antenne des techniques d'imagerie. Dans cet objectif, la calibration géométrique des grands réseaux de forme arbitraire notamment est une étape incontournable à laquelle nous travaillons déjà. Nous y reviendrons plus loin.

2.2.3 Diagnostic acoustique de l'environnement urbain

Dans le cadre de la Chaire UPMC "MObilité et qualité de VIE en milieu urbain (MOVIE)" financée par PSA et Renault, ∂ 'Alembert, en partenariat avec le laboratoire STMS de l'Ircam, est chargé d'étudier l'impact du trafic automobile sur l'environnement acoustique en milieu urbain. Participant à ce projet et au développement de $M\mu$, la thèse de Raphaël Leiba aura pour objectif de mettre en œuvre des méthodes d'imagerie pour cartographier et caractériser l'environnement acoustique dans la ville. Cette caractérisation devra couvrir toute la chaîne du bruit : des sources qu'il faudra identifier, aux riverains dont on se préoccupera de la perception du bruit, en passant par la propagation et la construction du champ acoustique urbain. *In fine* Nous chercherons d'une part à mettre au point de nouvelles méthodes de diagnostic acoustique de l'environnement, mais aussi à définir des indicateurs perceptifs adaptés.

Ce travail a déjà été initiée par le stage de M2 de R. Leiba pendant lequel nous avons déployé le système $M\mu$ pour surveiller le chantier de Jussieu, source permanente de bruits divers stationnaires et non stationnaires. Nous avons aussi simulé numériquement des scénarios d'ima-

gerie acoustique qui disposent des antennes multiples en des lieux choisis arbitrairement sur le campus pour offrir plusieurs point de vue simultanés.

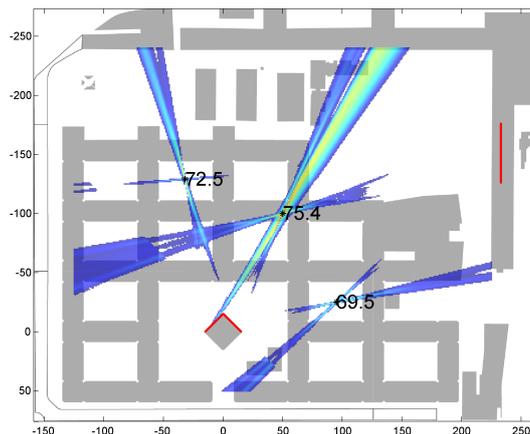


FIGURE 2.8 – $M\mu$ sur le Campus de Jussieu : Simulation d'imagerie de 3 sources de bruit blanc

La figure 2.8 présente une image acoustique obtenue par simulation à partir d'une antenne linéaire de 2×128 micros posée au sommet de la tour Zamanski (faces Nord et Est) et couplée à une autre antenne de 256 micros située sur une barre longeant la rue Cuvier. Les antennes sont repérées en rouge sur la figure.

Dans cette simulation rudimentaire, 3 sources de bruit blanc de niveau différent sont réparties arbitrairement sur le campus. Les sources et les antennes se situent dans un même plan horizontal. Les différentes antennes sont toutes parfaitement localisées en sorte qu'aucune erreur ne perturbe la phase des signaux arrivant aux antennes. Le rapport signal à bruit est fixé à 20 dB. Les phénomènes de diffraction et d'atténuation enfin sont négligés.

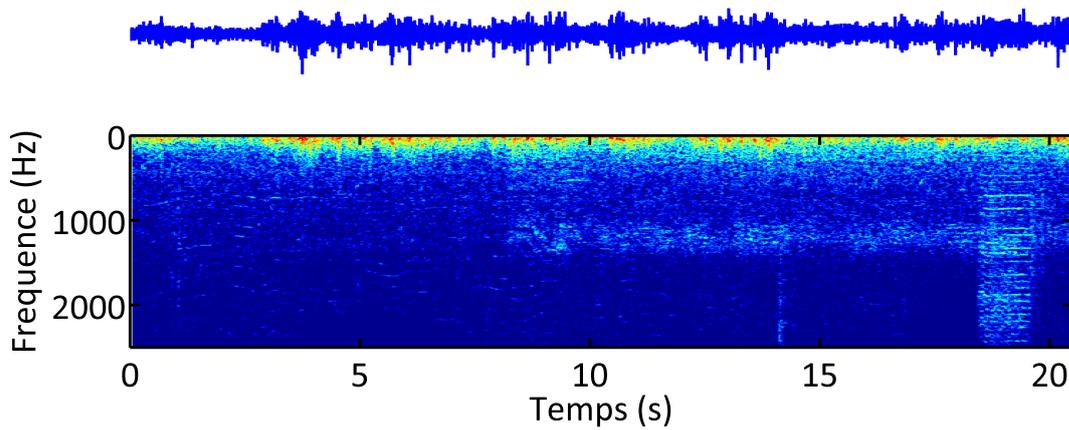
L'image résulte de l'intégration de l'énergie acoustique harmonique reconstruite par BF standard sur la bande d'octave à 1000 Hz. Dans ces circonstances idéales les sources sont résolues avec une très bonne précision, la dynamique apparente atteint 12 dB. On constate le potentiel qu'un tel système pourrait avoir pour la surveillance des nuisances sonores dans la ville.

Mais les hypothèses de simulation sont fortes, et il convenait de s'assurer que le système $M\mu$ a les capacités physiques de ses ambitions. Aussi des expériences préliminaires ont été menées sur le campus de Jussieu. Le résultat de BF standard présenté par la figure 2.9 a été obtenu grâce à une antenne linéaire de 128 micros espacés régulièrement au pas de 17 cm et qui couvre une longueur totale de 22 m. Ce réseau de MEMs a été disposé au sommet de la tour Zamanski et pointait vers l'est.

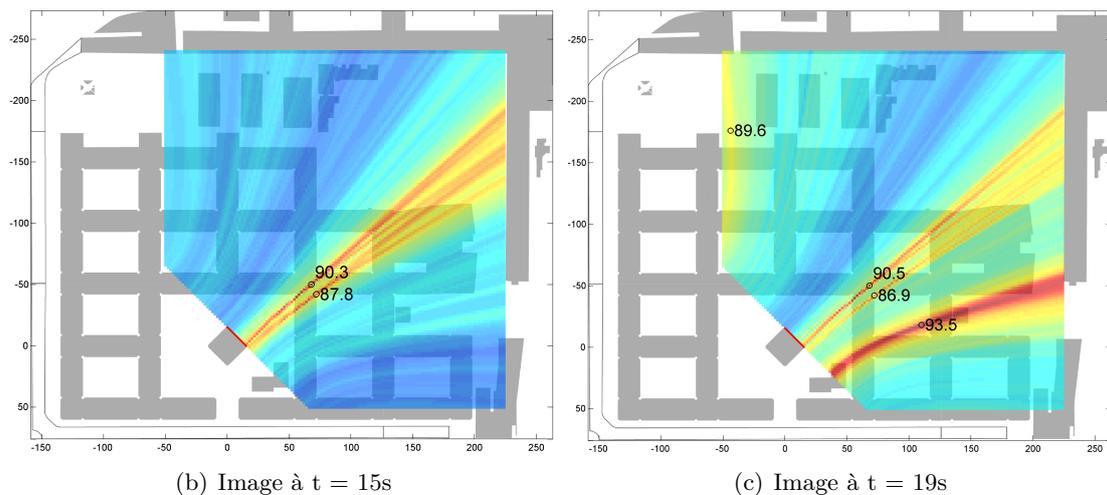
La figure 2.9(a), présente 20 s de signal enregistré sur l'un des microphones et son spectrogramme. Contrairement au cas de la simulation qui bénéficie du point de vue croisé de deux antennes, les images construites par BF standard ne permettent de reconstituer clairement que la direction des sources. La capacité de focalisation en deçà de la distance de Fraunhofer permet cependant d'approcher leur position et le niveau acoustique correspondant. Sur cet exemple, Le spectrogramme révèle très clairement une émergence acoustique puissante et l'écoute du signal permet de distinguer nettement le bruit caractéristique d'une disqureuse. La formation de voies situe cette source dans l'axe d'une zone de travaux bien identifiée située à 150 m de l'antenne. La dynamique des images est bonne, de l'ordre de 20 dB.

Grâce à cette expérience, nous avons établi qu'il est possible de localiser une source en environnement réel (vent turbulent, bruit ambiant, source instationnaire,...), sans traitement spécifique, ce qui valide le système $M\mu$ pour la cartographie acoustique en milieu urbain. Il reste cependant à établir ses limites en le confrontant à des situations plus représentatives de la vie urbaine normale.

On peut remarquer finalement que l'association d'antennes avec des points de vue différents permet d'enrichir l'information sur les sources en particulier en les localisant précisément, comme le montre la simulation. On verra au chapitre suivant que la disposition d'antennes en 3 dimensions autour des sources permet d'en savoir plus encore en donnant accès à leur fonction



(a) Signal d'un micro et son spectrogramme

(b) Image à $t = 15s$ (c) Image à $t = 19s$ FIGURE 2.9 – $M\mu$ sur le Campus de Jussieu : Mesures au sommet de la tour Zamanski

de directivité. Mais en pratique le déploiement d'antennes en 3D est extrêmement lourd, ce qui restreint sa mise en œuvre. On peut alors explorer plus avant les moyens d'améliorer les applications utilisant des réseaux simples 1D ou 2D. C'est l'objet de la section suivante qui décrit une autre partie du travail de thèse d'A. Peillot.

2.3 Formation de voies et principe de parcimonie

Parmi les différents scénarios envisagés au début du projet ECHANGE pour l'application de l'échantillonnage compressé et des méthodes parcimonieuses, la localisation des sources a naturellement trouvé sa place. L'objectif était de déterminer dans quelle mesure ces concepts peuvent améliorer la localisation par rapport au BF standard dont on a vu qu'il souffre d'une faible résolution aux basses fréquences et d'artefacts de repliement spectral en hautes fréquences. L'étude a été poussée au delà et c'est aussi confrontée aux méthodes à haute résolution telle Capon [54] et MUSIC [55], qui pallient les manques du BF mais restent sensibles aux faibles rapports signal à bruit.

Sur le plan théorique, le problème a déjà été exploré [56] en se limitant aux techniques de minimisation convexe de la norme ℓ_1 des signaux. Cette approche est numériquement lourde et n'est efficace que dans des situations restreintes. Nous avons pu explorer les alternatives offertes par les algorithmes de type *Orthogonal Matching Pursuit* (OMP) qui, combinés aux principes de l'échantillonnage compressé (CS) ont été mis en application avec succès.

Cette section rappelle d'abord brièvement le modèle mathématique du problème inverse de localisation des sources par réseau de microphone. Elle fait ensuite un inventaire de méthodes inverses dont certaines ont été testées, avant de présenter les résultats numériques et expérimentaux.

taux les plus significatifs de notre étude.

2.3.1 Position du problème direct

Le problème est formulé dans un contexte harmonique à la suite d'une analyse spectrale des signaux. Les pressions complexes issues des sources à localiser et mesurées par une antenne de M microphones sont notées $p_m (m = 1, \dots, M)$. Elles sont assemblées dans le vecteur de mesures \mathbf{p} . L'objectif est de trouver des sources dans un espace échantillonné suivant un maillage dont chacun des N nœuds constitue une source potentielle d'amplitude $x_n (n = 1, \dots, N)$ à identifier. On note \mathbf{x} le vecteurs des amplitudes aux nœuds. Mathématiquement on peut écrire le problème de propagation des sources aux micros sous la forme :

$$\mathbf{p} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \varepsilon \quad (2.1)$$

où $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_n \dots \mathbf{a}_N]$ est la matrice qui modélise la propagation des nœuds du maillage source aux points de mesure. La quantité ε décrit du bruit de mesure et inclue d'éventuelles erreurs du modèle (milieu non idéal, faiblement turbulent, par exemple). Le beamforming standard considère en chaque nœud de l'espace de reconstruction, ou point image, la présence d'une source omnidirectionnelle. Dans cette hypothèse le vecteur décrivant la propagation du $n^{\text{ième}}$ point image à chaque point de mesure s'écrit :

$$\mathbf{a}_n = \left(\frac{e^{-jk|r_{1n}|}}{|r_{1n}|} \dots \frac{e^{-jk|r_{mn}|}}{|r_{mn}|} \dots \frac{e^{-jk|r_{Mn}|}}{|r_{Mn}|} \right)^T, \quad n = 1 \dots N \quad (2.2)$$

2.3.2 Formulation du beamforming standard

Pour cartographier la zone image à moindre coût de calcul et obtenir les performances de la SonoCam, le beamforming de base se borne à inverser l'équation 2.1 pour produire l'estimateur $\tilde{\mathbf{x}}$:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{p} \quad (2.3)$$

Mais dans le cadre de la mesure en aéroacoustique qui traite des signaux aléatoires, le BF s'est avéré plus robuste en exploitant la matrice interspectrale (*Cross Spectral Matrix* : CSM), notée \mathbf{R} par la suite [57]. \mathbf{R} s'écrit :

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{p}\mathbf{p}^H] \quad (2.4)$$

où $E[\]$ exprime l'espérance mathématique et l'exposant H , le transposé conjugué. Pour l'estimation pratique de la matrice \mathbf{R} voir [58].

Finalement le BF standard (SBF) produit une carte du SPL sur le domaine image. Cette distribution notée $\tilde{\mathbf{x}}$, est obtenue par l'opération suivante :

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^H \mathbf{R} \mathbf{A} \quad (2.5)$$

Les sources sont localisées aux maxima de la distribution SPL.

Noter que si le SBF est plus robuste pour les signaux aléatoires large bande, lorsque le bruit est non négligeable, il conserve les mêmes défauts que la technique de base en terme de résolution et de repliement spectral.

Pour s'affranchir en partie de ces problèmes, des méthodes dites 'à haute résolution' ont été adaptées à l'imagerie acoustique, les méthodes Capon et MUSIC dont les formulations mathématiques et les caractéristiques principales sont rappelées en annexe D.

On notera que les méthodes à haute résolution, à condition d'un RSB suffisant, réussissent à distinguer les sources éventuellement proches, mais ne parviennent pas à mesurer leur niveaux relatifs et *a fortiori* leur niveau absolu.

Pour proposer une alternatives à ces méthodes à haute résolution, Antoine Peillot a dressé un état de l'art très exhaustif des méthodes d'imagerie de source. Deux méthodes en particulier peuvent être exploitées avec profit.

L'algorithme CLEAN, par exemple, [59], cherche à réduire les artefacts des lobes secondaires. Elle procède en 2 étapes, calculant d'abord une image des sources par une méthode classique

(SBF) puis dans un processus itératif substituant à la signature des différentes sources un diagramme idéal. Pour plus de détails sur les applications de CLEAN voir [60] et [61]. La méthode est efficace mais son processus itératif introduit de nouveaux artefacts qui peuvent ruiner la reconstruction.

La méthode DAMAS [62] [63] est aussi une méthode de déconvolution. Elle introduit une contrainte de parcimonie du champ source à estimer et utilise un algorithme de type LASSO pour résoudre le problème inverse. Mais la méthode nécessite le calcul de la matrice interspectrale \mathbf{R} ce qui rend son exploitation lourde numériquement.

2.3.3 Construction d'une méthode de beamforming parcimonieux

Notre objectif dans le projet ECHANGE était la mise au point des nouvelles méthodes de reconstruction fondées sur le caractère parcimonieux des divers phénomènes acoustiques étudiés. Ce qui suppose que ce caractère existe. S'agissant du scénario de localisation de sources, nous avons naturellement identifié l'espace de reconstruction comme domaine de parcimonie. C'est à dire que nous avons fait l'hypothèse que les sources y sont peu nombreuses.

Suivant les principes définis au premier chapitre, on sait que la solution du problème inverse fortement sous déterminé (les lieux potentiels des sources sont beaucoup plus nombreux que le nombre des mesures) peut être atteinte en utilisant des algorithmes favorisant les solutions parcimonieuses.

Dans le cas de l'holographie de champ proche, les méthodes basées sur la minimisation de la norme ℓ_1 de la solution ont été privilégiées et plusieurs études ont exploré cette piste pour la localisation des sources. Parmi elles, celle de Malioutov[56] menée par simulations numériques a montré qu'une méthode hybride ℓ_1 -SVD permet de localiser des sources avec une très grande résolution et surpasse MUSIC et CAPON lorsque le bruit est fort. Il restreint cependant son domaine de reconstruction au champ lointain et utilise une antenne respectant la condition de Shannon. La méthode échoue lorsque les micros sont répartis aléatoirement ou lorsque les sources sont en champ proche.

D'autres études dérivant du "Generalized inverse beamforming" [64] [65] substituent avantageusement une régularisation parcimonieuse par minimisation ℓ_1 à la régularisation de Tikhonov qui minimise l'énergie de la solution. Cependant l'estimation du paramètre de régularisation que contrôle la parcimonie est critique. S'il est surévalué, la parcimonie est forte et empêche l'estimation de certaines sources, s'il est trop faible le caractère parcimonieux est perdu et des sources parasites sont localisées. Le problème est le même pour les deux algorithmes de reconstruction testés : BPDN et LASSO. De plus ces algorithmes ne convergent que très lentement vers une solution stable.

C'est pourquoi nous avons proposé une alternative plus rapide qui fait appel à l'algorithme *Orthogonal Matching Pursuit* (OMP) et qui vérifie les principes de l'échantillonnage compressé (CS) permettant de réduire le nombre de mesures utiles.

Conditionnement des mesures

Comme pour les méthodes SBF, Capon et MUSIC, afin d'assurer une plus grande robustesse au bruit, la méthode proposée comprend l'étape initiale de calcul de la matrice interspectrale des signaux \mathbf{R} . L'étape suivante en fait la décomposition aux valeurs propres (cf. Eq.3.13). On construit ensuite un vecteur signal en éliminant les composantes associées au bruit. Les vecteurs propres \mathbf{u}_s associés aux valeurs propres λ_s les plus grandes sont extraits de \mathbf{R} . La suite du processus, contrairement à la méthode MUSIC, exploite l'espace signal. Le nouveau vecteur de mesure débruité s'écrit :

$$\mathbf{p}_s = \sum_{s=1}^S \sqrt{\lambda_s} \mathbf{u}_s \quad (2.6)$$

Il faut noter que, dans notre étude, ce conditionnement s'est avéré nécessaire dans les situations très bruitées simulées ou réelles. Lorsque le rapport signal à bruit en revanche était élevé, la méthode OMP décrite dans ce qui suit a montré de bonnes performances en traitant directement les signaux reçus \mathbf{p} sans besoin de calculer \mathbf{R} . C'est un avantage déterminant lorsqu'il

s'agit par exemple de traiter des signaux transitoires pour lesquels la matrice interspectrale ne peut être évaluée. Dans la suite, pour un traitement plus général, nous considérons le vecteur signal extrait de \mathbf{R} et donné par l'équation (2.6).

Formulation parcimonieuse du problème

Dans le cadre parcimonieux, le problème direct du rayonnement des sources (Eq.2.1) doit être formulé de la façon suivante :

$$\mathbf{p}_s = \mathbf{\Theta}\alpha = \mathbf{\Phi}\mathbf{D}\alpha = \mathbf{\Phi}\mathbf{x} \quad (2.7)$$

La matrice $\mathbf{\Theta}$ se décompose en une matrice de transfert $\mathbf{\Phi}$ et un dictionnaire \mathbf{D} , base dans laquelle le vecteur source $\mathbf{x} = \mathbf{D}\alpha$ est parcimonieux *i.e.* α ne compte que quelques composantes non nulles.

Dans notre problème de localisation des sources le domaine spatial est le domaine de parcimonie. Par hypothèse en effet, seuls quelques nœuds de l'espace de reconstruction portent une source. La définition d'un dictionnaire particulier n'est pas nécessaire et à la matrice \mathbf{D} on substitue la matrice identité ($\mathbf{D} = \mathbf{I}$). La matrice de transfert $\mathbf{\Phi}$ quant à elle s'identifie à l'opérateur de propagation \mathbf{A} donné par l'équation 2.2 : $\mathbf{\Phi} = \mathbf{A}$. Les vecteurs de propagation, \mathbf{a}_n , colonnes de la matrice \mathbf{A} constituent les atomes du problème. Il faut noter que la base constituée par ces atomes n'est pas orthogonale. on dit qu'elle présente une certaine redondance. Les atomes peuvent être partiellement corrélés.

Finalement le problème parcimonieux qu'il faut inverser pour localiser les sources s'écrit :

$$\mathbf{p}_s = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (2.8)$$

OMP pour la localisation des sources

Munis de ce cadre, on peut faire appel à la méthode OMP pour identifier la position des sources supposées en petit nombre par rapport au nombre de nœuds décrivant l'espace de reconstruction.

L'OMP [40] est un algorithme itératif classé parmi les algorithmes "gloutons" [66] dédiés à la reconstruction d'approximations parcimonieuses. L'adaptation d'OMP à notre problème construit pas à pas une approximation de la distribution des sources. Sa mise en œuvre est assez simple et on peut en décrire le fonctionnement comme suit : à chaque itération, l'atome le plus corrélé au vecteur mesure est sélectionné. Cet atome pointant un nœud du maillage de reconstruction, indique une position de source. Sa projection orthogonale sur le dictionnaire est ensuite soustraite de la mesure s . L'amplitude de la projection indique le niveau de la source. A chaque itération une source est indiquée en position et en amplitude.

On peut écrire le processus sous forme algorithmique :

0. Initialisation d'un résidu $\mathbf{r}^0 = \mathbf{p}_s$, $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ et $J^{(0)} = \emptyset$.
1. Itération $i = i + 1$
2. Sélection de l'atome le plus corrélé avec le résidu $\mathbf{r}^{(i)}$:

$$j = \arg \max_n |\mathbf{a}_n^H \mathbf{r}^{(i-1)}|$$

3. Mise à jour de l'ensemble des atomes sélectionnés :

$$J^{(i)} = J^{(i-1)} \cup j$$

4. Calcul de l'inverse généralisée de la matrice des atomes sélectionnés :

$$\mathbf{A}_{J^{(i)}}^\dagger = (\mathbf{A}_{J^{(i)}} \mathbf{A}_{J^{(i)}}^H)^{-1} \mathbf{A}_{J^{(i)}}^H$$

5. Calcul de l'opérateur de projection sur l'espace vectoriel engendré par les atomes sélectionnés :

$$\mathbf{P}_{J^{(i)}} = \mathbf{A}_{J^{(i)}} \mathbf{A}_{J^{(i)}}^\dagger$$

6. Mise à jour du résidu :

$$\mathbf{r}^{(i)} = \mathbf{r}^{(i-1)} - \mathbf{P}_{J^{(i)}} \mathbf{r}^{(i-1)}$$

7. Evaluation d'un critère d'arrêt

Finalement les coefficients de la solution, c'est à dire les amplitudes affectées aux sources, sont estimés par l'opération suivante :

$$\tilde{\mathbf{x}}_J = \mathbf{A}_J^\dagger \mathbf{p}_s. \quad (2.9)$$

Le nombre d'itérations définit la parcimonie de la solution, *i.e.* le nombre de sources. Il obéit à un critère d'arrêt. Ce critère peut être imposé arbitrairement parce qu'on sait initialement le nombre de sources, par exemple. On peut aussi le définir par rapport aux variables de l'algorithme. Ainsi l'énergie du résidu peut constituer un critère pertinent, sa stagnation pouvant indiquer l'absence de sources.

Tel qu'il est formulé l'algorithme ci-dessus, n'est pas optimisé. Il requiert notamment le calcul d'une inverse généralisée à chaque itération. Mais on peut l'implémenter de manière plus efficace. C'est ce qui a été fait pour notre étude en ajoutant une étape d'orthogonalisation des atomes sélectionnés comme suggéré dans [67].

L'intérêt principal d'OMP est sa rapidité quand l'ensemble des sources est très parcimonieux, car il faut alors très peu d'itérations. En comparaison, le processus de minimisation convexe de la norme ℓ_1 de BPDN converge lentement. En revanche, dans le cas de dictionnaires trop redondants, c'est à dire dont les atomes sont fortement corrélés, OMP est peu performant.

Résultats de simulation et comparaison aux méthodes standards

Nous avons évalué les performances d'OMP dans divers scénarios mettant à l'épreuve les caractères limitant du beamforming standard et des méthodes Capon et MUSIC. Les sources sont considérées en champ lointain et les antennes sont linéaires. Noter qu'en champ lointain la matrice de propagation est une base d'ondes planes plutôt que le dictionnaire d'ondes sphériques défini par l'équation 2.2)

La résolution, la dynamique et la sensibilité à l'*aliasing* ont été testées en premier lieu. Les signaux issus de deux sources décorréélées, respectivement à 10° et 14° , arrivent sur les micros de l'antenne dont la densité et la longueur sont contrôlées. Les niveaux de source diffèrent de 40 dB et les signaux sont perturbés par un bruit incohérent dont on choisit le niveau.

La figure 2.10 rend compte de quelques cas test.

Il faut constater d'emblée la constance de l'estimateur OMP qui semble presque insensible aux variations des paramètres et parvient dans tous les cas testés à identifier la direction des 2 sources en estimant correctement leur niveau relatif.

On remarque qu'OMP ne détecte rien d'autre que 2 directions de source. La parcimonie ayant été imposée à 2, toutes les autres directions sont affectées d'une amplitude nulle. Cet artifice procure à OMP une dynamique apparemment infinie quel que soit le niveau de bruit. On constate que les autres estimateurs sont fortement sensibles au bruit. Pour un RSB de 20 dB par exemple, la source la plus faible n'est détectée que par OMP (cf. fig.2.10(a) et 2.10(b))

Concernant la résolution, OMP s'avère légèrement plus efficace que Capon et MUSIC en présence de sources ponctuelles (cf. fig.2.10(c) et 2.10(d)). Pour Capon et MUSIC en effet l'estimation des sources est plus étendue lorsque la dynamique est faible. Le cas des sources étendues sera abordé avec les expériences décrites plus loin.

L'insensibilité au sous échantillonnage est également remarquable pour OMP (cf. fig.2.10(b) et 2.10(d)). Dans les directions des lobes de réseau, ou les trois autres estimateurs identifient des sources systématiquement, l'algorithme parcimonieux ne reconstruit rien.

Il faut tempérer cette performance en envisageant les hautes fréquences auxquelles les lobes de réseaux peuvent prendre des niveaux élevés et se substituer à des sources de plus faible amplitude.

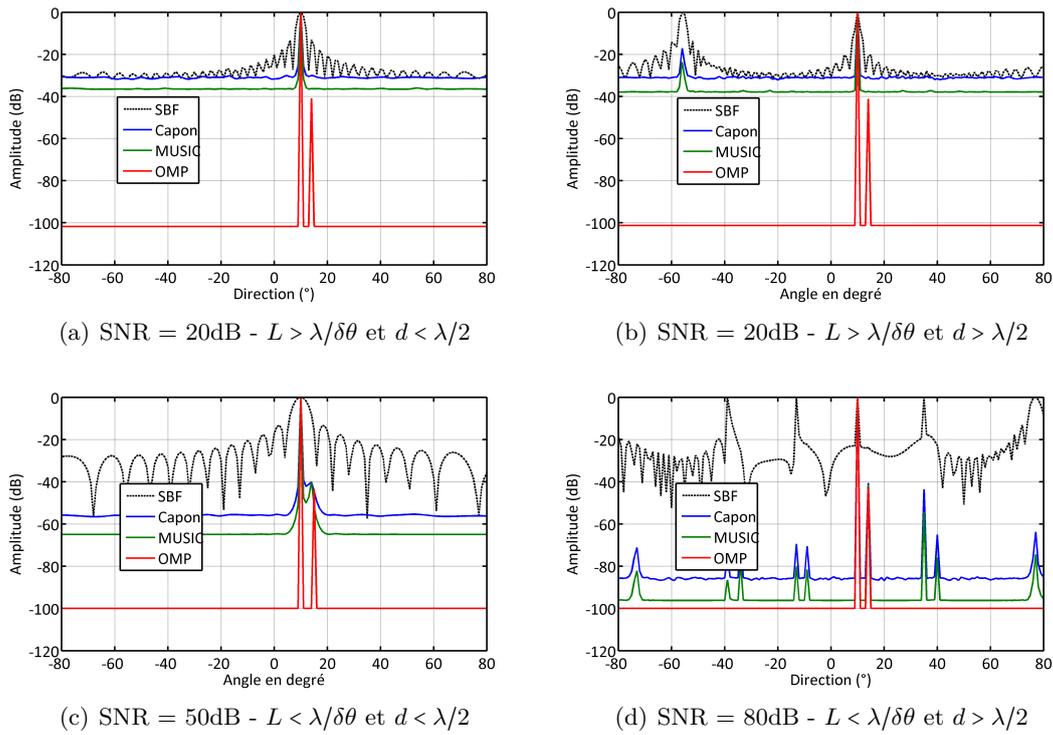


FIGURE 2.10 – Cas de 2 sources décorréliées à 10° et 14° ($\delta\theta = 4^\circ$) avec un réseau linéaire régulier. Paramètres : SNR, Pas des micros d , Longueur de l'antenne : L

Apport potentiel de l'échantillonnage compressé

Pour une valeur ajoutée supplémentaire à la technique parcimonieuse, nous avons étudié les performances théoriques d'un réseau linéaire satisfaisant, au moins partiellement, aux principes du CS. Ce réseau est fortement sous échantillonné et les micros y sont répartis aléatoirement. Il faut noter que d'un point de vue théorique, le caractère aléatoire est nécessaire mais ne suffit pas à la mise en œuvre du CS. Certaines propriétés mathématiques doivent aussi être satisfaites par la matrice de transfert \mathbf{A} . Nous ne les vérifions pas ici.

La figure 2.11 compare les résultats d'estimation de deux directions de sources placées à 30° et 35° de l'axe de l'antenne pour un réseau régulier (a), et un réseau aléatoire (b).

L'antenne régulière a une ouverture suffisante pour distinguer les sources. Le pas des micros est très grand ($d = 5\lambda$). Dans cette configuration très défavorable de sous échantillonnage, aucune des méthodes ne parvient à trouver correctement les sources. OMP en particulier échoue en sélectionnant la première source dans la direction d'un lobe de réseau.

L'antenne construite pour le CS à une longueur identique à la précédente mais n'est constituée que de 10 micros distribués aléatoirement. Dans cette configuration d'échantillonnage encore plus défavorable, le caractère aléatoire profite de façon spectaculaire à OMP qui réussit à isoler correctement les 2 sources contrairement aux autres méthodes .

Résultats expérimentaux

Ces bonnes performances de l'algorithme OMP ont été vérifiées expérimentalement dans le champ libre de la salle anéchoïque du LNE.

Trois sources sont disposées dans un plan à 5m de l'antenne plane REBECA décrite précédemment (cf.2.2.1). Le dispositif expérimental est présenté sur la figure 2.12. Comme on ne bénéficie pas ici de la réflexion du sol, on dispose de 120 microphones.

Les sources sont des haut-parleurs bafflés supposés omnidirectionnels. Elles émettent des bruits blancs totalement corrélés et de même niveau. La matrice interspectrale \mathbf{R} construite à partir des signaux microphoniques couvre la bande comprise entre 100 Hz et 8 kHz.

La figure 2.13 présentent les estimations de localisation des sources par algorithme OMP pour

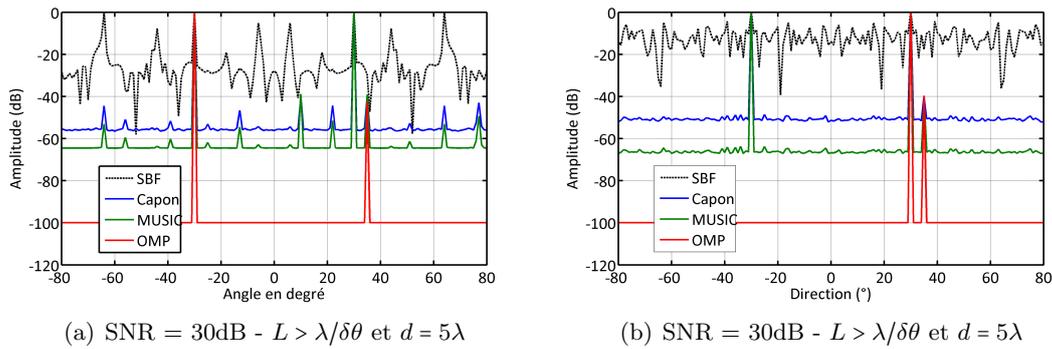


FIGURE 2.11 – Cas de 2 sources à 30° et 35° ($\delta\theta = 5^\circ$) avec un réseau linéaire régulier - Paramètres : SNR, Pas des micros d , Longueur de l'antenne : L

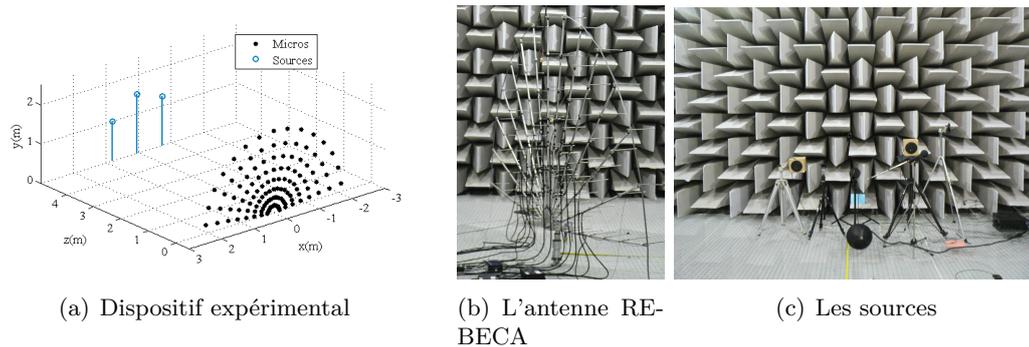


FIGURE 2.12 – Dispositif expérimental de localisation de sources en champ libre dans la chambre anéchoïque du LNE

des fréquences significatives, simulées ou expérimentales avec deux configurations d'antenne. (Une version plus grande de cette figure est donnée en annexe D).

En effet pour mettre en œuvre le CS, 64 microphones ont été sélectionnés parmi les 120 de l'antenne de base en conservant l'ouverture de l'antenne et quelques micros conservent l'espace minimum (cf. annexeD - fig.3.13)

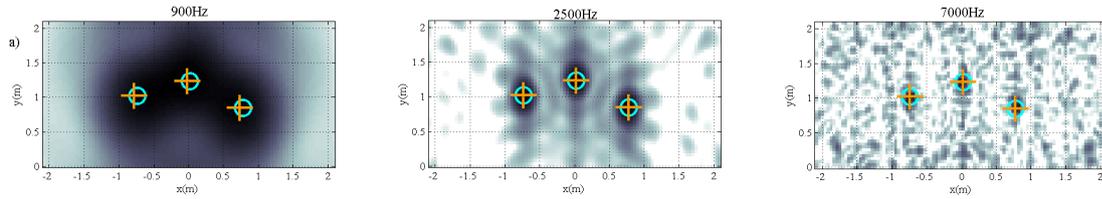
Les cartes de SPL obtenues par la méthode SBF sont mises en arrière plan des figures.

On peut faire les commentaires suivants :

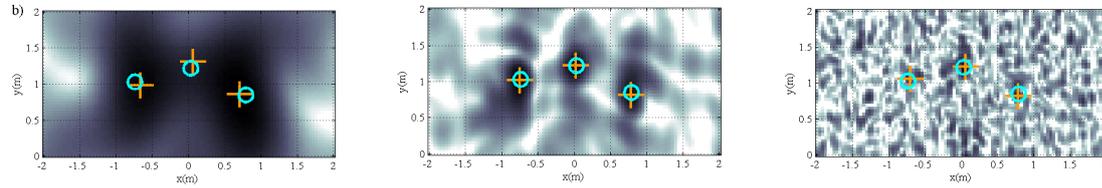
- A 900Hz, les sources sont séparées d'une distance inférieure au pouvoir de résolution. Le SBF échoue à séparer les trois sources. OMP permet de les localiser avec toutefois un léger biais. En utilisant l'antenne CS, le biais augmente à 10 cm. A 5 m de distance, il équivaut à 1° ce qui reste faible.
- A 2500Hz, la fréquence est optimale pour avoir une bonne résolution et des lobes secondaires faibles. Les estimations par OMP sont très bonnes et de même qualité avec l'antenne à 120 micros et avec l'antenne à 64 micros.
- A 7000Hz, les antennes sont fortement sous-échantillonnées et le SBF présente une forte densité d'alias. Avec l'antenne CS, la localisation par SBF devient impossible en raison du niveau trop fort des alias. La méthode OMP permet de localiser précisément les sources, avec des performances conservées, en réduisant le nombre de micros à 64.

L'échantillonnage compressé s'avère efficace sur toute la bande étudiée, avec une moindre performance en basses fréquences

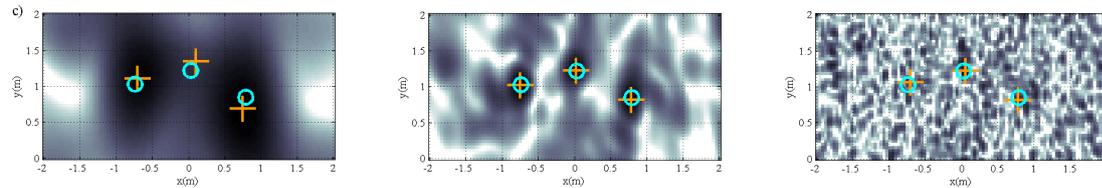
La thèse d'A. Peillot présente d'autres résultats tirés de ces expériences qui contribuent aussi à valider l'approche parcimonieuse pour la localisation des sources avec une antenne plane. Ils exploitent notamment l'algorithme de minimisation ℓ_1 BPDN et montrent que cette approche est moins robuste au bruit.



(a) Résultats de simulation avec 120 micros



(b) Résultats extraits des mesures avec 120 micros



(c) Résultats extraits des mesures avec 64 micros

FIGURE 2.13 – Estimations OMP de 3 sources omnidirectionnelles à 900Hz, 2500Hz et 7000Hz. Croix jaune : Estimateur OMP - Cercles cyan : Sources réelles. Carte SBF en arrière plan : Dynamique 20dB

Pour clore cette partie sur la localisation de sources par approximations parcimonieuses, dans le cadre du projet ECHANGE et de la thèse d'A. Peillot, un dernier travail a exploré une approche plus complexe qui prend en compte le caractère multifréquentiel des sources. Un algorithme de parcimonie dite structurée a été développé qui améliore les performances de la procédure BPDN. Ajouter l'information fréquentielle dans le problème d'optimisation permet d'améliorer la parcimonie du signal à reconstruire, et par conséquent la résolution. Le concept de parcimonie structurée sera abordé au chapitre suivant qui traite de l'identification de la directivité des sources.

2.4 Localisation de sources en mouvement

Il faut mentionner enfin un travail encore en gestation qui cherche à transposer les concepts, bien connus en Radar et en acoustique sous marine, de l'imagerie à haute résolution par synthèse d'ouverture, au domaine aérien. L'idée est d'inverser le principe de l'ouverture synthétique active qui tire profit du mouvement de l'antenne réceptrice pour construire une antenne virtuelle de grande longueur dotée d'un grand pouvoir de résolution. En inversant ce principe, notre objectif à l'aide d'un réseau fixe de microphones est de tirer avantage du déplacement d'un objet en mouvement pour localiser des sources dans son référentiel avec une grande précision. En perspective évidemment il s'agit de mieux localiser et quantifier les sources aéroacoustiques d'un véhicule en mouvement : avion, train automobile. Pour résoudre ce problème, nous faisons appel parallèlement à la modélisation analytique et aux méthodes d'optimisation éventuellement parcimonieuses.

2.5 Conclusions et perspectives

Ce chapitre a présenté les activités menées à $\partial\Omega$ d'Alembert dans le domaine de l'imagerie et de la localisation acoustique des sources audibles.

Ces recherches bénéficient de l'expertise de l'équipe d'acoustique dans la conception des antennes, des systèmes d'acquisition et du traitement du signal acoustique. Elles ont permis de développer des méthodes d'analyse novatrices et utiles au diagnostic du bruit en appliquant les principes de l'imagerie par formation de voies à grande échelle. Parallèlement des capacités d'imagerie des sources en temps réel sur une large bande de fréquence ont été atteintes. Elles rendent accessibles le diagnostic dynamique et l'étude des sources instationnaires.

Cette technique classique de formation de voies présentant des limites physiques bien connues, nous avons formulé et mis en œuvre expérimentalement une méthode originale fondée sur le principe de parcimonie. Le nombre des sources à localiser est supposé petit dans l'espace des lieux potentiels. La méthode adapte l'algorithme itératif *Orthogonal Matching Pursuit* qui favorise les solutions parcimonieuses du problème inverse. Contrairement aux méthodes à haute résolution auxquelles il a été confronté, l'OMP est très robuste au bruit de mesure. Il bénéficie en plus d'une convergence rapide.

Les perspectives ouvertes par ces travaux sont nombreuses et complémentaires. Les méthodes de diagnostic standard rapides et à grande échelle peuvent certainement tirer avantage des approches parcimonieuses qui souffrent cependant encore d'une certaine complexité numérique. Mais les connexions les plus prometteuses se font, grâce au projet $M\mu$ et aux travaux qui débutent dans le cadre de la chaire "MOVIE". Nous y prévoyons à courts termes le déploiement d'antennes de très grandes dimensions réparties dans l'espace 3D pour avoir une meilleure appréhension des sources et du milieu de propagation. Les applications décrites au chapitre suivant participent de ces objectifs.

Chapitre 3

Identification des sources et du milieu de propagation

Dans une perspective d'analyse pour le diagnostic (compréhension), de modélisation (prévision), voire de restitution (réalité virtuelle ou augmentée), l'appréhension d'un phénomène acoustique nécessite d'identifier objectivement plusieurs de ses acteurs au nombre desquels les sources et le milieu de propagation tiennent une part essentielle.

Les travaux présentés dans ce chapitre ont pour but de contribuer à cet objectif en proposant des méthodes d'identification acoustiques originales. Ils ont été initiés dans le cadre du projet ANR-ECHANGE par Antoine Peillot et Rémi Mignot et en collaboration avec Laurent Daudet et Gilles Chardon.

On expose pour commencer une méthode conjointe de localisation et d'identification du diagramme de directivité de sources[4]. La méthode est fondée sur un algorithme d'approximation parcimonieuse qui utilise un dictionnaire structuré associant les vecteurs directeurs pour la position et une base de décomposition en harmoniques sphériques pour la directivité. Nous avons testé cette méthode expérimentalement. Elle parvient à reconstruire des sources calibrées avec une bonne approximation.

Pour accéder aux sources à partir de mesures du champ, il faut disposer d'un modèle de propagation. Dans les applications réelles, ce modèle est généralement plus complexe que les modèles d'ondes planes ou sphériques utilisés jusque là et dépend fortement de l'environnement et des limites du domaine acoustique. Le travail présenté à la suite concerne l'identification du milieu de propagation et de ses limites. Nous avons ainsi cherché à interpoler, les réponses impulsionnelles d'une salle à partir de mesures en nombre réduit. Cette méthode [5] qui fait appel à un modèle de sources images met également en jeu les principes de parcimonie. Elle parvient à identifier la partie initiale, non diffuse, de réponses impulsionnelles réelles avec une bonne précision.

Dans la même perspective, la thèse d'Yves Pene, menée à l'ONERA, cherche à identifier des réponses impulsionnelles dans un milieu complexe et siège d'écoulement. Il procède en couplant des simulations numériques en aéroacoustique et des méthodes d'optimisation pour résoudre un problème inverse. A terme, les fonctions de Green identifiées doivent servir à l'imagerie expérimentale dans les nacelles de turboréacteur.

Un sujet connexe clos ce chapitre. Les applications précédentes font toutes appel à des réseaux de microphone étendus en 3 dimensions avec des distributions arbitraires. Nous présentons un travail mené dans le cadre du projet *Mmu* qui vise à la calibration géométrique d'antennes quelconques en exploitant l'analyse du champ diffus ambiant.

3.1 Identification de sources par approximation parcimonieuse

Lorsqu'on s'intéresse à la cause du bruit, l'identification des sources acoustiques est un sujet essentiel. En l'occurrence l'identification cherche à produire une description objective et quantifiée du phénomène physique qui génère le bruit.

Mais pour une identification correcte, une étape préliminaire de localisation est nécessaire.

Comme on l'a vu précédemment avec les méthodes d'imagerie acoustique plus ou moins évoluées, la localisation est souvent considérée comme suffisante et on se contente de balayer l'espace à la recherche de sources ponctuelles avec un modèle monopolaire, le plus simple qui soit. Mais il est vrai qu'à moins de disposer d'un point de vue plus complet des sources [68], il est illusoire de chercher une signature plus complexe [69].

Comme solution à ce problème, le travail mené par A. Peillot pour ECHANGE a permis de définir une stratégie conjointe de localisation et d'identification de sources acoustiques complexes. Cette méthode se base à nouveau sur une modélisation parcimonieuse pour la localisation et sur un dictionnaire d'harmoniques sphériques pour l'identification.

Le formalisme des harmoniques sphériques employé par la suite pour décrire les directivités complexes est d'abord rappelé brièvement. La section suivante décrit la stratégie numérique développée qui est fondée sur l'OMP et l'échantillonnage compressé. Pour valider la méthode, des expériences ont été menées sur des sources calibrées. Pour ces expériences afin de satisfaire à la condition d'une vision plus complète des sources, deux antennes 3D ont été construites qui permettent leur observation de toutes les directions de l'espace. Finalement les résultats de ces expériences sont discutés.

Modèles de sources par harmoniques sphériques

L'espace étant décrit par les coordonnées sphériques $(r, \Omega) = (r, \theta, \phi)$. La pression harmonique p , de nombre d'onde $k = 2\pi f/c$, issue d'une source ponctuelle située à l'origine peut être exprimée en tout point de l'espace sur la base des harmoniques sphériques : [70].

$$p(kr, \Omega) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{q=-l}^l x_n^q(k) h_l(kr) Y_l^q(\Omega) \quad (3.1)$$

Les quantités $Y_l^q(\Omega)$ sont les fonctions harmoniques sphériques (SH) d'ordre l et de degré q . Elles forment une base de fonctions orthogonales de directivités élémentaires (monopole, dipôle, quadripôle, ..., l -pôle). $h_l(kr)$, fonction de Hankel d'ordre l , traduit la variation radiale du champ à la fréquence d'étude. Enfin les x_n^q sont les coefficients de la décomposition à la fréquence f considérée. Ils constituent les inconnues du problème d'identification.

Des travaux récents [68] ont mis en évidence la forte variabilité des coefficients de la décomposition à la localisation préalable de la source analysée. C'est pourquoi, du fait de ses bonnes performances en localisation (cf. §2.3.3) l'algorithme OMP a été choisi pour participer à notre stratégie mixte.

Formulation du problème direct.

La méthode exploite une antenne de M microphones qui entoure la source à identifier. Les microphones échantillonnent le champ rayonné aux points de coordonnées $((r_m, \Omega_m)(m = 1, \dots, M)$. On note \mathbf{p} le vecteur des pressions complexes mesurées par les M microphones à la fréquence considérée. Le vecteur mesure s'écrit :

$$\mathbf{p} = [p(r_1, \Omega_1) \dots p(r_m, \Omega_m) \dots p(r_M, \Omega_M)]^T \quad (3.2)$$

L'espace de recherche de la source est géométrique mais contient aussi une dimension de directivité. En premier lieu un maillage volumique est défini dans un espace limité contenant la source. Ce maillage est constitué de N nœuds de coordonnées $(r_n, \Omega_n)(n = 1, \dots, N)$.

Puisque chaque nœud constitue une source potentielle, il est défini comme origine d'une base d'harmoniques sphériques locales. Pour réduire l'espace de recherche, la base des SH est limitée à d'ordre L . Chaque nœud n est finalement caractérisé par la base réduite de fonctions SH dont il est l'origine.

Enfin un vecteur \mathbf{x}_n de $(L + 1)^2$ coordonnées lui est affecté. Ces coordonnées sont les coefficients locaux de la décomposition SH. En l'absence de source au nœud n , ils sont nuls. On a :

$$\mathbf{x}_n = [(x_0^0)_n (x_1^{-1})_n \dots (x_l^q)_n \dots (x_L^L)_n]^T \quad (3.3)$$

Par ailleurs on peut modéliser le transfert du nœud n à chaque point de mesure dans une matrice \mathbf{A}_n de dimension $M \times (L + 1)^2$ définie par :

$$\mathbf{A}_n = [(\mathbf{a}_0^q)_n \dots (\mathbf{a}_l^q)_n \dots (\mathbf{a}_L^q)_n] \quad (3.4)$$

ou colonne de \mathbf{A}_n exprime le transfert suivant une SH donnée du nœud n à chacun des micros :

$$(\mathbf{a}_l^q)_n = [h_l(kr_{1n})Y_l^q(\Omega_{1n}) \dots h_l(kr_{Mn})Y_l^q(\Omega_{Mn})]^T \quad (3.5)$$

Pour contenir l'ensemble du maillage, les N vecteurs inconnus \mathbf{x}_n sont concaténés en un seul vecteur \mathbf{x} contenant $N(L + 1)^2 \times 1$ coefficients à identifier qui s'écrit : $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1^T \dots \mathbf{x}_n^T \dots \mathbf{x}_N^T]^T$.

Dans le même but, la matrice de transfert de tous les nœuds à tous les micros assemble les matrices \mathbf{A}_n correspondant à chaque nœud : $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1 \dots \mathbf{A}_n \dots \mathbf{A}_N]$

Finalement le modèle direct de rayonnement s'écrit simplement

$$\mathbf{p} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (3.6)$$

Le vecteur source \mathbf{x} est identifié en résolvant le problème inverse correspondant. \mathbf{x} contient les coefficients SH associés à chaque nœud n .

Le nombre de mesures étant généralement très petit devant les dimensions du vecteur source, le système est hautement sous-déterminé et a mathématiquement un nombre infini de solutions.

Cependant le nombre de sources effectivement présentes dans l'espace de recherche est supposé petit devant le nombre de nœuds qui décrivent cet espace. C'est à dire que le vecteur \mathbf{x} peut être considéré comme parcimonieux dans le domaine spatial. On se place donc dans le cadre de la reconstruction par approximation parcimonieuse. Si on reprend la terminologie dédiée à ce type de problème on peut définir la matrice \mathbf{A} comme le dictionnaire du problème *sparse* et ses colonnes $(\mathbf{a}_l^q)_n$ en sont les atomes.

Pour simplifier le problème, nous avons envisagé des scénarios mettant en jeu une source unique. Donc le vecteur source à identifier doit être 1-parcimonieux dans le domaine spatial. Parallèlement aucun caractère de parcimonie dans le domaine des harmoniques sphériques n'a été considéré.

Par ailleurs, afin de satisfaire aux conditions requises pour mettre en œuvre l'échantillonnage compressé et parvenir à l'objectif d'identification avec un minimum de microphones, nous avons disposé ces micros aléatoirement dans l'espace.

Stratégie de reconstruction structurée.

Du fait de ses bonnes capacités à localiser les sources (cf. §2.3.3) nous avons choisi l'algorithme OMP pour résoudre le problème parcimonieux inverse. Sa formulation a été adaptée pour prendre en compte le dictionnaire structuré en espace et fonctions SH. La procédure d'identification se déroule en deux étapes successives qui travaillent sur la même matrice de transfert \mathbf{A} . Dans une première étape le vecteur mesure est corrélé à chacun des atomes du dictionnaire \mathbf{A} et l'atome le plus corrélé détermine la position de la source à laquelle est associée un sous espace \mathbf{A}_n de fonctions SH.

Dans un second temps un processus itératif calcule les coefficients de la décomposition SH, composantes du sous-vecteur \mathbf{x}_n :

1. Initialisation du résidu $r_0 = \mathbf{p}$ et du compteur $k = 0$
2. Projection du résidu r_k sur les éléments $(\mathbf{a}_l^q)_n$ de \mathbf{A}_n tel que :

$$(x_l^q)_n = \max_{(l,q)} \langle (\mathbf{a}_l^q)_n, r_k \rangle$$

3. Soustraction au résidu r_k de sa projection orthogonale sur chaque atome restant du sous espace \mathbf{A}_n
4. Élimination de l'atome sélectionné.
5. Itération $k = k + 1$ jusqu'à $k = (L + 1)^2$

Noter que, par souci de simplification, cette séquence ne fait pas mention d'opérations intermédiaires d'orthogonalisation des atomes. L'algorithme est présenté de façon exhaustive dans la thèse d'A. Peillot.

Dans un premier temps, des simulations numériques utilisant des sources ponctuelles idéales ont permis de valider la stratégie parcimonieuse avec échantillonnage compressé et d'en évaluer les limites.

Il faut remarquer notamment que le nombre de microphones détermine l'ordre maximal de la décomposition SH identifiable. Ce problème est analogue à de l'*aliasing* spatial en coordonnées sphériques [71]).

La méthode par ailleurs est sensible aux erreurs de positionnement des microphones. Ce qui nous amène à envisager la mise au point de méthodes spécifiquement dédiées à ce problème. Nous y reviendront dans la dernière partie de ce chapitre.

Comme il est évoqué dans [68], le décalage de la source par rapport aux nœuds du maillage de reconstruction est également source d'erreur.

Le niveau de bruit enfin est un paramètre important.

La sensibilité de la méthodes à ces divers facteurs d'erreur augmente avec l'ordre de la source. C'est pourquoi dans la mise en œuvre expérimentale, nous avons choisi de limiter l'ordre de la base SH à $L = 3$, ce qui réduit la complexité de l'identification à des phénomènes physiques relativement simples.

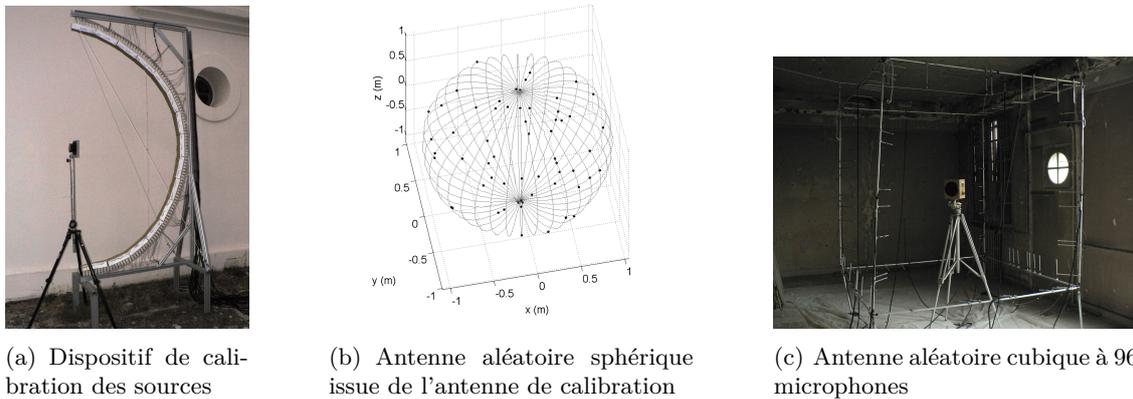


FIGURE 3.1 – Les antennes du projet ECHANGE pour l'identification des sources

Calibration de sources test.

Pour évaluer la méthode expérimentalement, nous avons mesuré le diagramme de directivité de deux sources élémentaires à l'aide d'une antenne semi-circulaire de rayon 1m avec 120 micros au pas de 1.5° . Pour ce faire, on a enregistré leur réponse impulsionnelle pour 36 positions azimuthales au pas de 10° . La sphère virtuelle de 1m de diamètre entourant les sources est donc échantillonnée par plus de 4000 points. Le dispositif de calibration est présenté figure 3.1(a). La première source test de type dipolaire consiste en un simple haut-parleur non bafflé. La seconde, de type monopolaire est un haut parleur bafflé de petite taille. Les résultats de calibration des deux sources à l'ordre 3 des SH sont présentés sur la figure 3.2

Résultats expérimentaux.

Pour la validation expérimentale, nous avons considéré d'abord une antenne virtuelle de 32 microphones tirés aléatoirement dans l'ensemble des mesures de calibration réparties sur la sphère de 1m de rayon. Ensuite une nouvelle antenne a été construite en disposant 96 micros sur les arêtes d'un cube. Ces antennes sont présentées sur la figure 3.1

Les sources sont excitées par une impulsion réelle ou synthétisée par la méthode de la compression d'impulsion. L'amplitude du rayonnement dans une direction donnée est fournie par le niveau de l'impulsion directe.

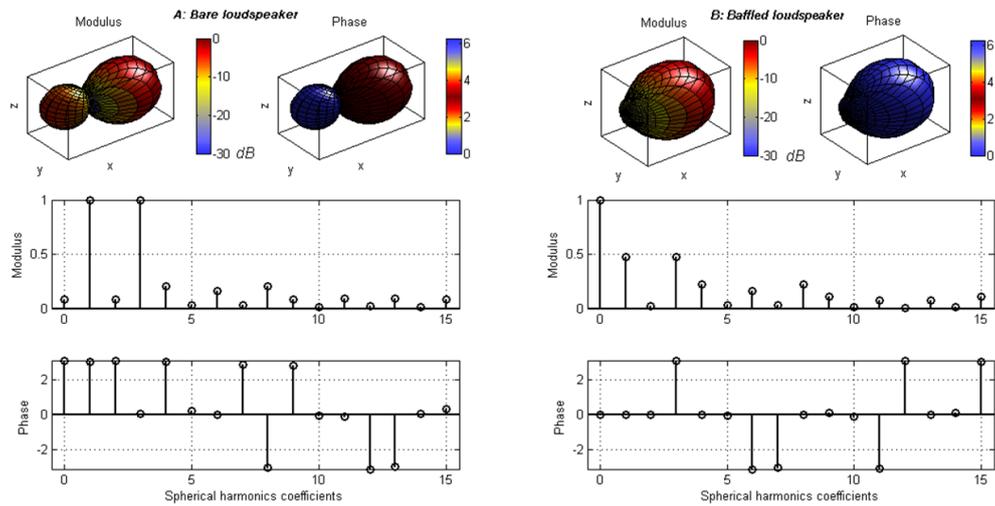


FIGURE 3.2 – Sources calibrées - Directivités mesurées et décomposition SH à l'ordre 3 - a) Type dipolaire - b) Type monopolaire

Des exemples d'approximation des sources test obtenus avec les deux types d'antenne sont présentés sur les figures 3.3 et 3.4

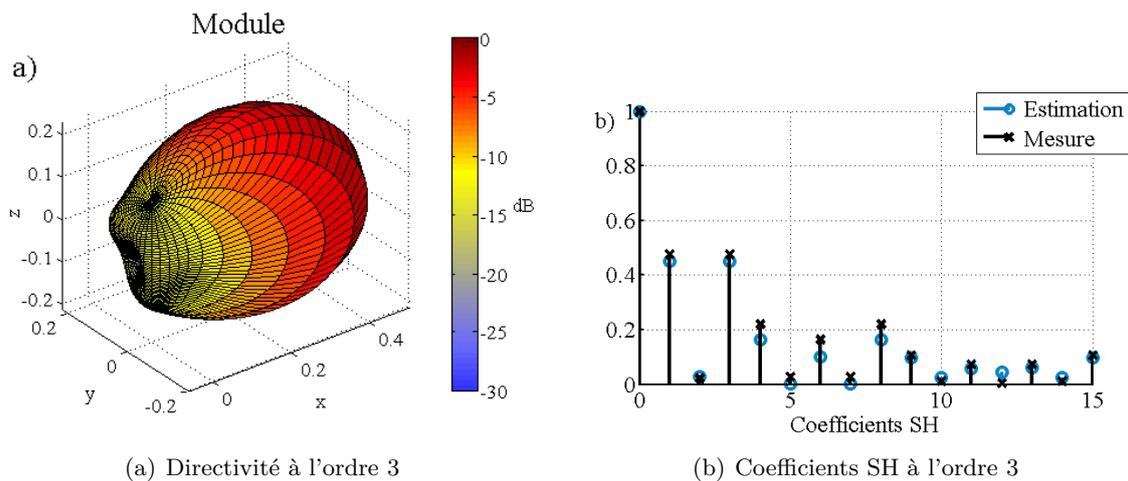


FIGURE 3.3 – Estimation de la source de type monopolaire par OMP structuré avec 32 micros répartis aléatoirement sur une sphère

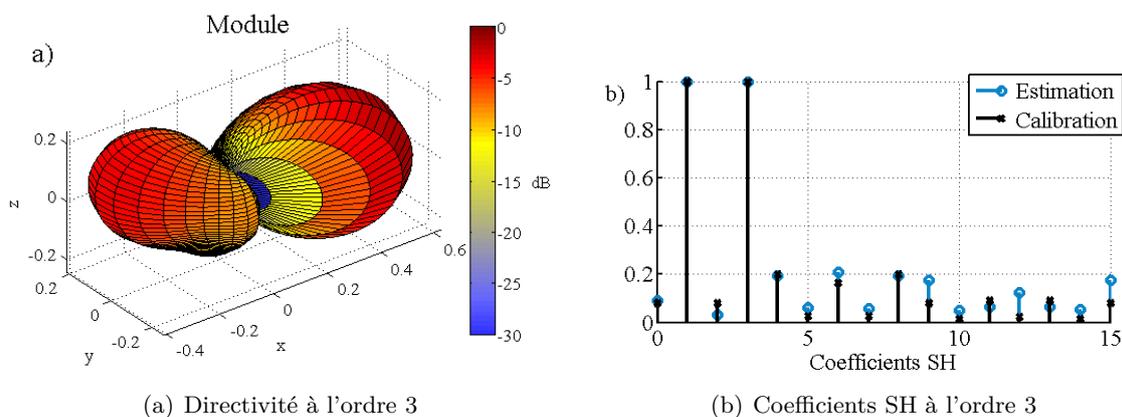


FIGURE 3.4 – Estimation de la source de type dipolaire par OMP structuré avec 96 micros répartis aléatoirement sur les arêtes d'un cube

Avec les 2 types d'antenne, les coefficients SH des 2 sources sont identifiés correctement. Les corrélations avec les diagrammes de directivité de calibration dépassent généralement 90%.

Conclusion

Cette section a présenté une nouvelle stratégie de localisation et d'identification de sources acoustiques complexes. Nous avons utilisé un modèle de parcimonie structurée en enrichissant le dictionnaire d'un modèle de décomposition en harmoniques sphériques. Ce modèle permet la localisation et l'identification de sources complexes grâce à des algorithmes adaptés, fondés sur l'OMP.

Nous avons montré que la mesure de la fonction de directivité de sources est possible en utilisant des antennes tri-dimensionnelles en considérant un nombre réduit de microphones.

Cette méthode cependant n'est pas robuste pour des ordres de source élevés qui exigent un plus grand nombre de microphones. Mais la question se pose, au-delà d'un certain ordre, de la pertinence de la modélisation des sources et des phénomènes physiques qui y sont attachés.

Dans l'environnement confiné et réverbérant de notre salle d'expérience, les problèmes d'échos parasites ont nécessité l'utilisation de signaux impulsionnels. La méthode n'est donc pas encore validée pour des signaux réels qui demanderont un environnement anéchoïque ou une adaptation spécifique au milieu réverbérant. On pourra pour cela s'inspirer d'une technique de séparation des champs [72] ou encore d'une méthode spécifique des milieux réverbérants[73].

Dans les actions à venir prochainement associées au projet $M\mu$, des enregistrements d'écoulements aéroacoustiques en salle anéchoïque sont prévus au laboratoire P' à Poitiers. Ces expériences pourraient bénéficier de notre méthode pour identifier des phénomènes turbulents.

Dans la partie suivante nous nous sommes intéressés non pas aux sources, mais à leur environnement et au domaine de propagation. La recherche qui concerne plus spécifiquement le domaine de l'acoustique des salles et la restitution sonore, était une fois encore, motivée par l'application des méthodes parcimonieuses en acoustique, préoccupation au cœur du projet ECHANGE. Ce travail a été mené par Rémi Mignot au cours de son post-doctorat à ∂ 'Alembert en 2012-2013 et en collaboration avec Laurent Daudet.

3.2 Interpolation de RIR par échantillonnage compressé

En acoustique des salles on peut déterminer le transfert entre une source et un récepteur en mesurant la réponse impulsionnelle de la salle (RIR). La RIR est une fonction du temps qui dépend des positions respectives de la source et du récepteur. La connaissance complète de l'ensemble des RIRs d'un espace donné a de nombreuses applications. On peut par exemple, en réalité virtuelle, téléconférence ou dans les jeux vidéos prendre en compte les variations spatiales de la réverbération pour améliorer l'impression d'immersion des auditeurs. Par ailleurs, les systèmes généralement utilisés dans ces applications, réseaux d'émetteurs ou de récepteurs, fondent leur traitement sur des modèles de propagation en champ libre et leur performance décroissent en présence de réverbération. L'utilisation des RIR pourraient améliorer leurs performances [74].

La fonction plenacoustique (PAF) d'une salle constitue l'ensemble de ses réponses impulsionnelles. Ce concept a été introduit théoriquement [75] en considérant un échantillonnage régulier de l'espace. Mais en pratique réaliser une telle mesure en 3D en respectant le théorème d'échantillonnage de Shannon est impossible.

La théorie modale peut aider à résoudre ce problème, mais seulement à des fréquences inférieures à la fréquence de Schröder au delà de laquelle le champ acoustique est nécessairement diffus et qui décroît lorsque les dimensions de la salle augmentent.

Certaines études[76, 77] ont montré que l'information essentielle portée par la RIR réside dans sa partie initiale. Notre travail avait donc comme objectif l'interpolation partielle des RIR dans les 3 dimensions de l'espace. Pour cela nous avons proposé [5] de mettre en œuvre les principes de l'échantillonnage compressé.

Pour modéliser le problème parcimonieux sous-jacent nous avons fait appel à la méthode des sources images et représenté les RIR comme la contribution d'un nombre réduit de sources

virtuelles monopolaires en champ libre. On peut alors considérer que les réflexions précoces interviennent avec parcimonie dans l'espace des temps.

Il faut noter que ce modèle ne présuppose pas la connaissance de la géométrie de la salle, ni des propriétés des parois en réflexion. Une telle condition dépasse les capacités des algorithmes des logiciels de prédiction acoustiques commerciaux.

Dans notre hypothèse la seule information disponible provient de mesures en un nombre limité de points dans l'espace d'étude. Notre but était d'interpoler ces mesures spatialement.

Considérant un nombre limité K de sources monopolaires localisées aux positions \mathbf{s}_k et émettant chacune une impulsion d'amplitude β_k , on modélise la pression acoustique p reçue par un récepteur placé en \mathbf{r} par :

$$p(t, \mathbf{r}) = \sum_{k=0}^K \beta_k \frac{\delta(t - |\mathbf{s}_k - \mathbf{r}|/c)}{4\pi |\mathbf{s}_k - \mathbf{r}|} \quad (3.7)$$

Les β_k , caractéristiques des sources virtuelles, sont les inconnues du problème inverse.

La stratégie de reconstruction se base sur un ensemble de mesures issu d'une antenne de M microphones répartis irrégulièrement dans l'espace. Cet ensemble consiste en M réponses impulsionnelles. Elles subissent un conditionnement complexe pour constituer un vecteur mesure \mathbf{P} qui décrit un domaine espace 3D-fréquences.

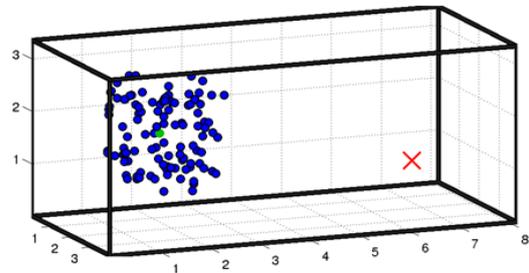
Dans ce même espace on définit un dictionnaire qui modélise le transfert des points de mesure aux nœuds d'un maillage volumique, circonscrit à une boule. Le rayon de la boule, lieu de sources virtuelles potentielles, est déterminé par la durée des réponses impulsionnelles à reconstruire. Sur ce maillage volumique le vecteur $\mathbf{B} = (\beta_k) (k = 1, \dots, K)$ est supposé parcimonieux.

Le problème inverse parcimonieux, en réalité beaucoup plus complexe, est résolu en faisant appel à l'algorithme *Basis Pursuit denoising* (BPDN) qui minimise la norme ℓ_1 de la solution.

Des simulations numériques ayant validé la stratégie, une antenne a été construite pour une expérience en environnement réel. L'antenne compte 120 micros assemblés suivant une distribution aléatoire préalablement optimisée. La figure 3.5 présente ce dispositif et le scénario d'interpolation.



(a) Dispositif expérimental



(b) Scénario d'interpolation : Mesures (•) - Point d'interpolation (•) - Source(x)

FIGURE 3.5 – Expérience d'interpolation de réponses impulsionnelles de salles

L'antenne placée dans une salle quelconque en présence d'une source réelle, on mesure les 120 réponses impulsionnelles. 119 RIR sont utilisées pour interpoler la 120^{ème} par le processus décrit plus haut. Le résultat d'une telle interpolation est présenté figure 3.6. Il est représentatif des performances de la méthode, dont on peut dire qu'elle remplit efficacement l'objectif. Cependant son efficacité décroît lorsqu'on réduit le nombre de micros utilisés pour l'interpolation ou qu'on s'éloigne du centre de l'antenne. Les coefficients de corrélation calcul/mesure cependant restent corrects ($C > 75\%$ avec 12 micros ou à 1.5m du centre).

On peut envisager d'améliorer ces résultats en exploitant par exemple, certains *a priori* comme la position de la source, des dimensions approximatives de la salle, ou encore en résolvant les problèmes de calibration de l'antenne *in-situ*. Nous évoquons ce sujet en fin de chapitre.

Mais *in fine* l'efficacité de la méthode ne sera garantie que par la confrontation aux utilisateurs des RIR interpolés.

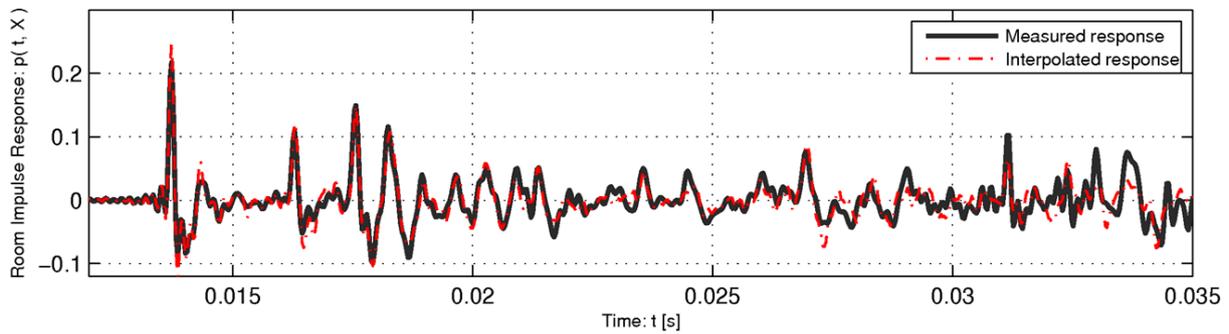


FIGURE 3.6 – Approximation parcimonieuse d’une RIR réelle

3.3 Beamforming en milieu complexe

La thèse d’Yves Pene (Dir. R. Marchiano), se déroule à l’ONERA sous la supervision de V. Fleury et D. Mincu. Ce travail procède du même objectif que l’étude précédente : identifier les réponses impulsionnelles d’un milieu de propagation donné, ou leurs duales en fréquence, les fonctions de Green, quand leur mesure est impossible ou trop complexe.

Pour l’ONERA l’enjeu est important puisqu’il s’agit au bout de l’étude de localiser les sources de bruit au cœur des nacelles de turboréacteur.

La technique choisie pour cette identification est la formation de voies à partir de mesures réalisées à l’extérieur de la nacelle en fonctionnement.

Ce scénario extrêmement complexe met en jeu un milieu de propagation partiellement confiné, siège d’écoulements généralement turbulents et contenant des objets faisant obstacle à la propagation des ondes acoustiques des sources aux points de mesure. Dans le milieu de propagation règnent donc des phénomènes parasites de diffraction et de diffusion qu’il est impossible de mesurer ou de modéliser analytiquement.

Or le beamforming, comme on l’a vu plus haut, nécessite la connaissance d’un modèle de propagation pour constituer le noyau du problème inverse qui permet d’accéder aux sources. L’alternative à la mesure et à la modélisation analytique est la modélisation numérique.

Aussi l’idée proposée par V. Fleury et D. Mincu est de synthétiser les fonctions de Green caractéristiques du milieu complexe entre l’intérieur de la nacelle et les points de mesure acoustique, à partir de simulations numériques du problème direct.

Pour modéliser numériquement la propagation des ondes dans le milieu géométriquement complexe et siège d’écoulements turbulents, ils utilisent le code CAA-sAbrinA, développé à l’ONERA. Ce code CAA (*Computational AeroAcoustics*) met en œuvre, dans le domaine temporel, une combinaison des équations de la dynamique des fluides instationnaires et des équations de l’acoustique perturbées.

La première étape consiste à définir les conditions aux limites du milieu de propagation et des écoulements. On synthétise ensuite, en un certain nombre de positions dans le milieu, des sources acoustique large bande décorrélées. Les positions des sources sont les nœuds du domaine \mathbf{x} à reconstruire par beamforming. Le code CAA produit ensuite les signaux de pression acoustique mesurés aux micros d’une antenne virtuelle située dans le milieu de propagation.

Les signaux source et les signaux reçus étant connus, on peut théoriquement calculer les fonctions de transfert des sources aux micros qui sont les réponses impulsionnelles recherchées \mathbf{g} . Pour estimer ces RI, le problème inverse est résolu par la méthode de régression régularisée *Elastic Net*[78] qui combine les avantages des méthodes LASSO et Tikhonov.

Les réponses impulsionnelles estimées constituent finalement le noyau du beamformer qui doit permettre de remonter aux sources réelles des bruits à partir de mesures réelles obtenues dans des conditions de fonctionnement identiques à celles simulées.

La construction des différents éléments de la méthode : le conditionnement du code CAA pour l’implémentation du problème direct, la modélisation du problème inverse qui synthétise les réponses impulsionnelles, l’exploration pour le choix des algorithmes d’optimisation des RI, ont été au cœur de la thèse d’Yves Pene qui touche à son terme. La reconstruction des sources doit

finale­ment être évaluée numériquement en comparant les performances de la méthode hybride CAA/ElasticNet avec celles de méthodes plus classiques dans des cas tests de complexité limitée, dont on connaît l'expression analytique des fonctions de Green. Cette phase d'évaluation finale est en cours.

Une nouvelle thèse débute en septembre 2014 pour consolider les résultats, étendre l'étude au cas de sources aux parois, et évaluer aussi le gain que pourrait apporter la méthode de retournement temporel substituée au beamforming standard.

3.4 Calibration géométrique des grands réseaux de microphones

Pour clore ce dernier chapitre, il faut aborder un problème pratique complexe que nous avons été amenés à soulever en diverses occasions : lorsqu'on déploie des antennes portant de nombreux microphones dans un objectif d'imagerie, de localisation et/ou d'identification des sources ou encore d'estimation de réponses impulsionnelles acoustique, il est nécessaire de connaître avec une précision suffisante la position individuelle des microphones.

En effet toutes ses applications sont basées sur la combinaison des signaux des microphones et de leurs interférences. Or le caractère constructif de ces interférences est essentiellement déterminé par la phase correctrice (ou le retard correcteur) affecté à chaque signal pour rendre compte de la propagation depuis les sources jusqu'aux microphones. Ce problème est d'autant plus critique que la fréquence des signaux est élevée (et la longueur d'onde petite). Comparativement, la sensibilité des microphones qui affecte l'amplitude des signaux joue un rôle beaucoup moins crucial, même s'il convient de ne pas le négliger.

Il faut donc avoir une connaissance aussi précise que possible de la position relative des microphones et de l'espace de reconstruction. Lorsque le nombre de microphones est réduit à quelques unités, il est relativement aisé de mesurer la position absolue de chaque microphone. Mais lorsqu'on est amené à mettre en œuvre, plusieurs dizaines de microphones, l'opération est beaucoup plus fastidieuse, comme nous avons pu l'expérimenter en déployant nos antennes pseudo-aléatoires. Si l'on met de côté les techniques de localisation optiques encore financièrement inabordables, seul un support rigide permet de connaître avec précision la géométrie d'une antenne.

Dans les perspectives de nos travaux et du développement du projet $M\mu$, nous envisageons d'étendre des réseaux de plusieurs centaines voire milliers de microphones, et de leur donner des formes arbitraires adaptées *in situ* aux phénomènes étudiés. La structure rigide n'est plus alors une solution pertinente.

Il nous faut donc envisager des méthodes acoustiques de calibration géométrique. Le champ de recherche qui concerne la localisation de récepteurs acoustiques (souvent couplé à celui de la localisation des sources) excite depuis un certain temps la communauté scientifique du traitement du signal audio et donne lieu à une littérature abondante, faisant appel à des méthodes mathématiques très diverses.

Ces méthodes sont pour la plupart fondées sur la mesure initiale de temps de vol ou de différences de temps de vol et résolvent ensuite un problème combinatoire. Au cours de sa thèse, A. Peillot a exploré et mis en application certaines de ces techniques en obtenant des précisions suffisantes pour ses expériences. Il a notamment appliqué avec profit la méthode proposée dans l'article [79].

Cependant la mesure des temps de vols est sujette à l'imprécision lorsque la bande passante des systèmes acoustiques à calibrer (sources et micros) est réduite ou que l'on travaille en milieu réverbérant ou le trajet direct peut être confondu avec les premiers échos. Et cette imprécision est préjudiciable à la reconstruction de la géométrie de l'antenne.

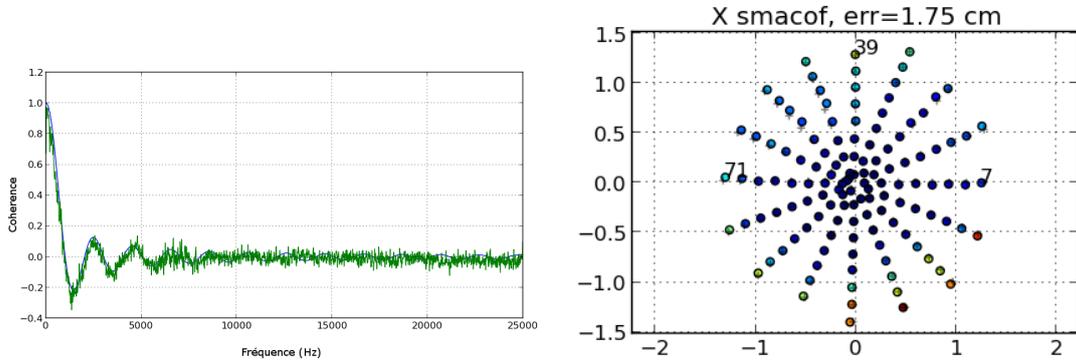
C'est pourquoi, dans le cadre de la thèse de C. Vanwynsberghe, nous nous sommes tournés vers une méthode passive qui tire profit du bruit acoustique ambiant autour de l'antenne auquel peut être affecté un modèle de champ diffus.

Dans une publication très récente [80], un modèle de champ diffus est développé précisément à destination de notre objectif de calibration géométrique.

Cette étude montre que la fonction de cohérence γ_{ij} entre les signaux de deux microphones

(i, j) immergés dans un champ diffus parfait peut être modélisée par une fonction sinus cardinal dont l'argument dépend directement de la distance d_{ij} entre les micros. On écrit simplement :

$$\gamma_{ij}(\omega) = \text{sinc}\left(\frac{\omega d_{ij}}{c}\right) \quad (3.8)$$



(a) Fonction de cohérence entre 2 micros : Mesure (—) - Modèle en sinc (—) (b) Reconstruction de l'antenne 2D de la SonoCam

FIGURE 3.7 – Résultats expérimentaux de calibration géométrique en champ ambiant diffus

Dans l'étude en question le concept est prouvé par simulation numérique. Nous avons pu le prouver expérimentalement. Une expérience a été montée avec l'antenne de la Sonocam et le système $M\mu$ dans l'environnement réverbérant du grand hall du site de Saint-Cyr-l'Ecole sans certitude de la nature diffuse du bruit ambiant. Nous avons pu évaluer des fonctions de cohérences 2 à 2 pour les 128 micros de l'antenne. Un exemple de résultat expérimental est présenté sur la figure 3.7(a).

Pour parvenir à ce résultat, le paramétrage du calcul des densités spectrales de puissance est une étape critique. Il faut remarquer que la distance augmentant entre les micros, le sinc devient plus pointu et la régression linéaire peine à déterminer la distance d_{ij} . Des alternatives devront être explorées pour y parvenir de façon plus robuste. Le processus est par ailleurs limité par les caractéristiques de la chaîne d'acquisition et en particulier par la bande passante des microphones.

Nous sommes finalement parvenus à obtenir des estimations de toutes les distances inter micros d_{ij} . A partir de cet ensemble euclidien de grande dimension, l'étape suivante a pour objectif d'extraire la géométrie de l'antenne. Pour cela nous faisons appel à un algorithme de type *MultiDimensional Scaling* (MDS)[81, 82] dont la variation classique (CMDS) s'apparente à une analyse en composante principale.

L'objectif général de ces méthodes MDS utilisées dans des champs de recherche très variés, est de convertir un grand ensemble de distances entre objets en un ensemble de plus petites dimensions géométriquement observable.

Nous cherchons donc à reconstruire le vecteur \mathbf{r} qui exprime la géométrie de l'antenne. Le problème mathématique à résoudre par MDS s'écrit :

$$\tilde{\mathbf{r}} = \underset{i,j}{\operatorname{argmin}} \sum (\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|^2 - d_{ij}^2) \quad (3.9)$$

Les premières applications de ces techniques nous ont permis de reconstruire avec une excellente précision la distribution régulière de 8 micros sur l'un des rayons de l'antenne SonoCam, long de 1.2 m, avec une erreur inférieure à 4 mm. Après avoir testé diverses versions de MDS, les essais les plus récents sur l'antenne complète, nous permettent, dans un cadre supervisé, d'obtenir une erreur moyenne inférieure à 2 cm (cf. figure 3.7(b)) L'application à des géométries 3D est d'ores et déjà programmée.

Le but ultime de cette recherche est de parvenir à une technique robuste à l'environnement (sources parasites, topographie, ...) qui ne nécessiterait qu'un minimum d'*a priori* sur la géométrie du réseau.

3.5 Conclusions et perspectives

Une partie importante des travaux menés ces dernières années a donc été consacrée au développement de méthodes expérimentales d'identification des éléments du champ acoustique : sources et voies de propagation.

Pour l'identification des sources acoustiques nous avons mis au point une méthode d'analyse originale. Elle produit des sources une décomposition sur une base de fonctions harmoniques sphériques jusqu'à l'ordre 3. En adoptant une modélisation parcimonieuse structurée, nous avons développé un algorithme adapté de l'*Orthogonal Matching Pursuit* qui mène conjointement la localisation sur un maillage prédéfini et la décomposition en SH. Des sources de laboratoire, d'ordre faible (2 max), calibrées très finement en directivité, ont pu être estimées expérimentalement par cette méthode avec une bonne précision. Le champ était échantillonné en utilisant des antennes de microphones étendues dans les 3 dimensions de l'espace autour des sources pour disposer d'un point de vue enveloppant.

Cependant le succès de la technique dépend fortement de l'écart éventuel entre le centre acoustique de la source recherchée et le nœud du maillage de reconstruction le plus proche. Ce problème devra être résolu en faisant appel à des stratégies alternatives de localisation. Les problèmes dûs à la réverbération en environnement réel devront aussi être levés pour pouvoir étudier des sources stationnaires ou de longue durée. Enfin la méthode devra être confrontée à la présence de plusieurs sources éventuellement corrélées.

Les voies de propagation dans une salle sont déterminées par les réponses impulsionnelles (RIR). Nous avons développé une méthode d'interpolation de ces RIR basée sur un ensemble réduit de RIR mesurées. Cette méthode adapte la technique des sources images pour conférer au problème un caractère parcimonieux qui permet de mettre en œuvre des algorithmes d'approximation dédiés. La méthode parvient à interpoler spatialement avec efficacité la partie initiale de RIR non mesurées. Pour parachever cette étude, des méthodes d'interpolation ou de synthèse de la partie diffuse des RIR devra être envisagée.

Ces deux techniques se rejoignent dans la mise en œuvre. Elles nécessitent l'une et l'autre le déploiement en 3 dimensions d'un grand réseau de microphones à distribution aléatoire. D'autres projets à venir se basent sur des réseaux semblables et à terme beaucoup plus grands dont la géométrie arbitraire devra pouvoir être déterminée *in situ*. Nous travaillons actuellement au développement d'une telle méthode par des moyens acoustiques exploitant les propriétés du bruit ambiant.

Il faut citer, dans la perspectives de pousser plus loin ces axes, un développement direct de $M\mu$ en gestation à ∂ 'Alembert : le projet "*Les murs ont des oreilles*" (MODO) . Il prévoit d'équiper une salle d'expérience de parois incrustées de plusieurs centaines de microphones MEMs dans le but d'explorer de nouveaux champs d'analyse et de synthèse en acoustique.

Conclusion

La recherche en acoustique aérienne expérimentale à l'Institut ∂ 'Alembert s'est attachée depuis une dizaine d'années au développement de méthodes d'analyse des sources et des champs acoustiques. Ces méthodes sont fondées sur l'exploitation de grandes antennes de microphones et de leur enregistreurs dédiés, instruments conçus et développés par les chercheurs, ingénieurs et techniciens du site de Saint-Cyr-l'école pour les besoins des projets successifs. Il faut d'ailleurs souligner l'avantage inestimable qu'a apporté à ces recherches cette équipe technique d'une grande compétence.

Les méthodes expérimentales proposées mettent en œuvre des principes parfois déjà bien établis sur le plan théorique, mais qui manquent d'applications à grande échelle pour pouvoir en exploiter les potentialités. C'est le cas de l'holographie et de l'imagerie par formation de voies.

Grâce à la méthode d'holographie impulsionnelle développée à ∂ 'Alembert, il a été possible au laboratoire du musée de la musique, par exemple, de caractériser une large collection d'instruments anciens et de construire une méthodologie pour rationaliser plus encore les processus de restauration. Ceux-ci combinent l'analyse de structure expérimentale pour le diagnostic et la modélisation numérique pour la prédiction des effets des actions de restauration. La parallélisation des divers algorithmes de NAH associée aux systèmes que développe le projet $M\mu$ devrait, à terme, permettre de réaliser l'holographie en temps réel effectif. Ce qui ouvre des perspectives pour l'étude des phénomènes instationnaires et le diagnostic dynamique en vibroacoustique.

Le potentiel de l'imagerie acoustique aérienne par formation de voies classique est encore souvent limité par les dimensions réduites des antennes et des systèmes d'acquisition. Le temps réel, désormais accessible, pose dans ce domaine également des problèmes nouveaux et des perspectives de recherche enthousiasmantes. L'étude des sources mobiles en particulier soulève des questions théoriques intéressantes comme la transposition des principes de synthèse d'ouverture pour identifier les sources aéroacoustiques des véhicules terrestres et aériens.

Les très grandes antennes de $M\mu$ pourront aussi tirer avantage des algorithmes de beamforming classiques pour caractériser l'environnement par exemple, et contribuer à l'établissement de cartographies du paysage sonore qui sont généralement simulées par méthodes numériques. La preuve de ce concept est un des objectifs du programme MOVIE qui débute et dont ∂ 'Alembert est un des acteurs.

Pendant le projet ECHANGE qui a associé des mathématiciens, des spécialistes du traitement du signal et des acousticiens, nous avons pu appliquer fructueusement aux champs acoustiques de nouveaux principes d'analyse. Ils permettent de résoudre les problèmes inverses précédents avec des performances augmentées et en réduisant sensiblement le taux d'échantillonnage spatial. Cependant les algorithmes fondés sur les concepts avancés de parcimonie et d'échantillonnage compressé sont encore lents et limités aux tâches de post-traitement. En attendant que les concepteurs d'algorithme résolvent ce problème, il convient de pousser plus avant l'exploitation de ces principes et de leur trouver de nouvelles applications en acoustique.

Deux sujets nouveaux ont émergé à l'occasion d'ECHANGE. La caractérisation du rayonnement des sources acoustiques complexes à partir d'antennes 3D a montré sa pertinence, mais a aussi posé des questions qui en feront un axe de travail majeur dans les années à venir, avec pour objectif les applications aux phénomènes réels tels l'observation et l'identification des sources aéroacoustiques dans les écoulements.

Dans le domaine de l'acoustique des salles et plus généralement des milieux confinés, la connaissance des réponses impulsionnelles qui déterminent la réverbération et la construction du champ acoustique est un préalable indispensable à la mise en œuvre des moyens d'exploration.

On a apporté à ce problème un début de solution qui appelle naturellement des recherches futures. Le projet MODO en sera le cadre.

Enfin les développements du projet $M\mu$ apporteront leur lot de questions. Nous travaillons d'ores et déjà à la calibration géométrique non supervisée des très grandes antennes de distribution arbitraire qui nous introduit encore à de nouveaux concepts.

Bibliographie

- [1] C. Vanwynsberghe, R. Marchiano, F. Ollivier, P. Challande, H. Moingeon, and Marchal J. Design and implementation of a multi-octave-band audio camera for realtime diagnosis. *Applied Acoustics*, (Soumis mars 2014).
- [2] G. Chardon, A. Peillot, F. Ollivier, N. Bertin, R. Gribonval, and L. Daudet. Nearfield acoustic holography using sparse regularization and compressive sampling principles. *J. Acoust. Soc. Am.*, 132(3), 2012.
- [3] Antoine Peillot, François Ollivier, Gilles Chardon, and Laurent Daudet. Localization and identification of sound sources using compressive sampling techniques. 2011.
- [4] François Ollivier, Antoine Peillot, Gilles Chardon, and Laurent Daudet. Acoustic sources joint localization and characterization using compressed sensing. *J. Acoust. Soc. Am.*, 131(4) :3257–3257, 2012.
- [5] R. Mignot, L. Daudet, and F. Ollivier. Room reverberation reconstruction : Interpolation of the early part using compressed sensing. *Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on*, 21(11) :2301–2312, Nov 2013.
- [6] D Ewins. *Modal testing : theory and practice*. Wiley and Sons, 1984.
- [7] L. Hermans and H. Van der Auweraer. Modal testing and analysis of structures under operational conditions : Industrial applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 13(2) :193 – 216, 1999.
- [8] Siu-Kui Au, Feng-Liang Zhang, and Yan-Chun Ni. Bayesian operational modal analysis : Theory, computation, practice. *Computers and Structures*, 126(0) :3 – 14, 2013.
- [9] Earl G. Williams, J. D. Maynard, and Eugen Skudrzyk. Sound source reconstructions using a microphone array. *J. Acoust. Soc. Am.*, 68(1) :340–344, 1980.
- [10] J.D. Maynard, E.G. Williams, and Y. Lee. Nearfield acoustic holography : I, theory of generalized holography and the development of NAH. *J. Acoust. Soc. Am.*, 78(4) :1395–1413, 1985.
- [11] W. A. Veronesi and J. D. Maynard. Nearfield acoustic holography (nah) II. holographic reconstruction algorithms and computer implementation. *J. Acoust. Soc. Am.*, 81(5) :1307–1322, 1987.
- [12] W. A. Veronesi and J. D. Maynard. Digital holographic reconstruction of sources with arbitrarily shaped surfaces. *J. Acoust. Soc. Am.*, 85(2) :588–598, 1989.
- [13] N.P. Valdivia and E.G. Williams. Study of the comparison of the methods of equivalent sources and boundary element methods for near-field acoustic holography. *J. Acoust. Soc. Am.*, 6(120) :3694–3705, 2006.
- [14] A. Schuhmacher, J. Hald, K. B. Rasmussen, and P. C. Hansen. Sound source reconstruction using inverse boundary element calculations. *J. Acoust. Soc. Am.*, 14(113) :114–127, 2003.

- [15] Matteo Frigo and Steven G. Johnson. FFTW : An adaptive software architecture for the FFT. In *Proc. 1998 IEEE Intl. Conf. Acoustics Speech and Signal Processing*, volume 3, pages 1381–1384. IEEE, 1998.
- [16] Earl G. Williams. Regularization methods for near-field acoustical holography. *J. Acoust. Soc. Am.*, 110(4) :1976–1988, 2001.
- [17] Y. Kim and P.A. Nelson. Optimal regularisation for acoustic source reconstruction by inverse methods. *Journal of Sound and Vibration*, 275(3-5) :463–487, 2004.
- [18] Rick Scholte, Ines Lopez, N.B. Roozen, and Henk Nijmeijer. Wavenumber domain regularization for near-field acoustic holography by means of modified filter functions and cut-off and slope iteration. *Acta Acustica united with Acustica*, 94(3) :339–348, May/June 2008.
- [19] G.H. Golub, M. Heath, and G. Wahba. Generalized cross-validation as a method for choosing a good ridge parameter. *Technometrics*, 21 :215–223, 1979.
- [20] L. Tronchin, A. Cocchi, and C. Consani. Vibrational and acoustical radiation in two harpsichords of XVII century. In *ISMA2001*, 2001.
- [21] N. Giordano. Sound production by a vibrating piano soundboard : Experiment. *J. Acoust. Soc. Am.*, 104(3) :1648–1653, 1998.
- [22] H. Suzuki. Vibration and sound radiation of a piano soundboard. *J. Acoust. Soc. Am.*, 80(6) :1573–1582, 1986.
- [23] R. Moore and S.A. Zietlow. Interferometric studies of a piano soundboard. *J. Acoust. Soc. Am.*, 119(3) :1783–1793, 2006.
- [24] R. Savage, E.L. Kottick, and K.D. Marshall. Air and structural modes of a harpsichord. *J. Acoust. Soc. Am.*, 91(4) :2180–2189, 1992.
- [25] S. Le Moyne, S. Le Conte, F. Ollivier, J. Frelat, J.-C. Battault, and S. Vaiedelich. Restoration of a 17th century harpsichord to playable condition : A numerical and experimental study. *Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1) :888–896, 2012.
- [26] S. Le Conte, S. Le Moyne, F. Ollivier, and S. Vaiedelich. Using mechanical modelling and experimentation for the conservation of musical instruments. *Journal of Cultural Heritage*, 13(3S) :S161–S164, 2012.
- [27] S. Le Moyne, F. Ollivier, and S. Le Conte. Vibroacoustic behavior of a vihuela. In *SMAC2013 - Stockholm*, volume B3, 2013.
- [28] A. Mamou-Mani, J. Frelat, and C. Besnainou. Numerical simulation of a piano soundboard under downbearing. *J. Acoust. Soc. Am.*, 123(4) :2401–6, 2008.
- [29] A. Mamou-Mani, J. Frelat, and C. Besnainou. Prestressed soundboards : analytical approach using simple systems including geometric nonlinearity. *Acta Acustica*, 95 :915–926, 2009.
- [30] A. Mamou-Mani, S. Le Moyne, F. Ollivier, C. Besnainou, and Frelat J. Prestress effects on the eigenfrequencies of the soundboards : Experimental results on a simplified string instrument. *Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1) :872–877, 2012.
- [31] F. Jacobsen and V. Jaud. Statistically optimized near field acoustic holography using an array of pressure velocity probes. *J. Acoust. Soc. Am.*, 31(121) :1550–1558, 2006.
- [32] F. Ollivier, S. Le Moyne, and C. Picard. Experimental comparison of pu probes and microphone arrays for use in impulse acoustical holography. In *14th International Congress on Sound and Vibrations.*, Cairns, Australia, 2007.

- [33] Antoine Peillot. *Imagerie acoustique par approximations parcimonieuses des sources*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 2012.
- [34] N. Bertin, A. Peillot, G. Chardon, F. Ollivier, R. Gribonval, and L. Daudet. NACHOS : Reproducible compressive nearfield acoustic holography. <http://exchange.inria.fr/nah/>, last visited 19/06/2014.
- [35] Robert Tibshirani. Regression shrinkage and selection via the Lasso. *Journal of the Royal Statistical Society*, 58 :267–288, 1996.
- [36] E. van den Berg and M. P. Friedlander. SPGL1 : A solver for large-scale sparse reconstruction. <http://www.cs.ubc.ca/labs/scl/spgl1> last visited 19/06/2014.
- [37] M. Grant and S. Boyd. CVX : Matlab software for disciplined convex programming, version. <http://cvxr.com/cvx>, last visited 19/06/2014.
- [38] A. Moiola, R. Hiptmair, and I. Perugia. Plane wave approximation of homogeneous helmholtz solutions. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik (ZAMP)*, 62 :809–837, 2011. 10.1007/s00033-011-0147-y.
- [39] G. Chardon, A. Leblanc, and L. Daudet. Plate impulse response spatial interpolation with sub-nyquist sampling. *Journal of Sound and Vibration*, 330(23) :5678 – 5689, 2011.
- [40] Y. C. Pati, R. Rezaifar, and P. S. Krishnaprasad. Orthogonal matching pursuit : Recursive function approximation with applications to wavelet decomposition. In *Proc. 27 th Ann. Asilomar Conf. Signals, Systems, Computers*, pages 40–44, 1993.
- [41] Emmanuel J. Candes and Michael B. Wakin. An introduction to compressive sampling. *IEEE Sig. Proc. Mag.*, 21(2) :21–30, March 2008.
- [42] Zhimin Peng, Ming Yan, and Wotao Yin. Parallel and distributed sparse optimization. In *Signals, Systems and Computers, 2013 Asilomar Conference on*, pages 659–646, Nov 2013.
- [43] Sébastien Paillasseur, Jean-Hugh Thomas, and Jean-Claude Pascal. Regularization for improving the deconvolution in real-time near-field acoustic holography. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(6) :3777–3787, 2011.
- [44] C. Pézerat, Q. Leclère, N. Totaro, and M. Pachebat. Identification of vibration excitations from acoustic measurements using near field acoustic holography and the force analysis technique. *Journal of Sound and Vibration*, 326(3 ?5) :540 – 556, 2009.
- [45] G. Rosi, R. Paccapeli, F. Ollivier, and J. Pouget. Optimization of piezoelectric patches positioning for passive sound radiation control of plates. *Journal of Vibration and Control*, 19(5) :658–673, 2012.
- [46] S. Benacchio, A. Mamou-Mani, B. Chomette, and F Ollivier. Modal PD state active control applied to a simplified string instrument. *Journal of vibration and controls*, (Soumis aout 2013).
- [47] S. Le Moyne, F. Ollivier, J. Frelat, and C. Besnainou. Acoustic radiation of a split carbon composite soundboard guitar compared to wooden classical guitars. In *SMAC2013 - Stockholm*, volume B3, 2013.
- [48] Don H. Johnson and Dan E. Dudgeon. *Array Signal Processing : Concepts and Techniques*. Simon & Schuster, 1992.
- [49] Sebastien Debert and Francois Ollivier. Large array optimization using a genetic algorithm and application to wide band moving sources imaging. *J. Acoust. Soc. Am.*, 123(5) :3388–3388, 2008.

- [50] Francois Ollivier. Non stationary tire-road noise analysis using large array beam forming in the time and frequency domains. *J. Acoust. Soc. Am.*, 123(5) :3388–3388, 2008.
- [51] Ines Hafizovic, Carl-Inge Colombo Nilsen, Morgan Kjolerbakken, and Vibeke Jahr. Design and implementation of a mems microphone array system for real-time speech acquisition. *Applied acoustics*, 73(2) :132–143, feb 2012.
- [52] Carl-Inge Colombo Nilsen and Ines Hafizovic. Digital beamforming using a GPU. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vols 1- 8, proceedings*, pages 609–612, New York, USA, 2009. IEEE Signal Proc Soc, IEEE.
- [53] Carlos J. Martin-Arguedas, David Romero-Laorden, Oscar Martinez-Graullera, Manuel Perez-Lopez, and Luis Gomez-Ullate. An ultrasonic imaging system based on a new soft approach and a gpu beamformer. *IEEE transactions on ultrasonics ferroelectrics and frequency control*, 59(7, SI) :1402–1412, JUL 2012.
- [54] Zhisong Wang, Jian Li, Petre Stoica, Toshikazu Nishida, and Mark Sheplak. Constant-beamwidth and constant-powerwidth wideband robust capon beamformers for acoustic imaging. *J. Acoust. Soc. Am.*, 116(3) :1621–1631, 2004.
- [55] R.O. Schmidt. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, AP-34 :276–280, 1986.
- [56] D. Malioutov, M. Çetin, and A. S. Willsky. A sparse signal reconstruction perspective for source localization with sensor arrays. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 53(8) :3010–3022, 2005.
- [57] R. P. Dougherty and T.J. (Ed.) Mueller. *Aeroacoustic Measurements*, chapter Beamforming in Acoustic Testing, pages 63–97. Springer, Berlin, 2002.
- [58] M. H. Hayes. *Statistical Digital Signal Processing and Modeling*, chapter Spectrum Estimation, pages 391–492. John Wiley and Sons, New York, 1996.
- [59] J.A. Hoggom. Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 15 :417–426, 1974.
- [60] P. Sijtsma. CLEAN based on spatial source coherence. *International Journal of Aeroacoustics*, 6(4) :357–374, 2007.
- [61] V. Fleury and J. Bulté. Extension of deconvolution algorithms for the mapping of moving acoustic sources. *J. Acoust. Soc. Am.*, 129(3) :1417–1428, March 2011.
- [62] T.F. Brooks and W.M. Humphreys. A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays. *J. Sound Vib.*, 294 :856–879, 2006.
- [63] T. Yardibi and J. Li. Sparsity constrained deconvolution approaches for acoustic source mapping. *J. Acoust. Soc. Am.*, 123(5) :2631–2642, 2008.
- [64] T. Suzuki. l_1 generalized inverse beamforming algorithm resolving coherent/incoherent, distributed and multipole sources. *Journal of Sound and Vib.*, 330 :5835–5851, 2011.
- [65] P.A.G Zavala, W. De Roeck, K. Janssens, J.R.F Arruda, P. Sas, and W. Desmet. Generalized inverse beamforming with optimized regularization strategy. *Mechanical Systems and Sig. Proc.*, 25 :928–939, 2010.
- [66] J.A Tropp. Greed is good : Algorithmic results for sparse approximation. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 50 :2231–2242, 2004.
- [67] T. Blumensath and M.E. Davis. In greedy pursuit of nex directions : (nearly) orthogonal matching pursuit by directional optimisation. In *EUSIPCO'08*, Lausanne, Switzerland, August 2008.

- [68] I.B. Hagai, M. Pollow, M. Vorlander, and B. Rafaely. Acoustic centering of sources measured by surrounding spherical arrays. *J. Acoust. Soc. Am.*, 130(4) :2003–2015, 2011.
- [69] C. Bouchard, D. I. Havelock, and M. Bouchard. Beamforming with microphones arrays for directional sources. *J. Acoust. Soc. Am.*, 125(4) :2098–2104, 2009.
- [70] E. G. Williams. *Fourier Acoustics : Sound Radiation and Near Field Acoustical Holography*. Academic press, London, 1999.
- [71] B. Rafaely, B. Weiss, and E. Bachmat. Spatial aliasing in spherical microphone arrays. *IEEE Trans. Signal Proc.*, 55(3) :1003–1010, 2007.
- [72] Y. Braikia, M. Melon, C. Langrenne, E. Bavu, and A. Garcia. Evaluation of a separation method for source identification in small spaces. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(1) :323–331, 2013.
- [73] T. Nowakowski, L Daudet, J. De Rosny, and G. Chardon. Localisation de sources en milieu réverbérant par décomposition parcimonieuse du champ acoustique sur un modèle hybride pression-vitesse. In *Proceedings of Colloque Grets*, 2013.
- [74] Terence Betlehem and Thushara D. Abhayapala. Theory and design of sound field reproduction in reverberant rooms. *J. Acoust. Soc. Am.*, 117(4) :2100–2111, 2005.
- [75] T. Ajdler, L. Sbaiz, and M. Vetterli. The plenacoustic function and its sampling. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 54(10) :3790–3804, Oct 2006.
- [76] Jean-Marc Jot, Laurent Cerveau, and Olivier Warusfel. Analysis and synthesis of room reverberation based on a statistical time-frequency model. In *Audio Engineering Society Convention 103*, Sep 1997.
- [77] Jean-Dominique Polack. Playing billiards in the concert hall : The mathematical foundations of geometrical room acoustics. *Applied Acoustics*, 38(2) :235–244, 1993.
- [78] Hui Zou and Trevor Hastie. Regularization and variable selection via the elastic net. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 67 :301–320, 2005.
- [79] N. Ono, H. Kohno, N. Ito, and S. Sagayama. Blind alignment of asynchronously recorded signals for distributed microphone array. In *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, pages 161–164, 2009.
- [80] Mohammad J. Taghizadeh, Philip N. Garner, and Hervé Boursard. Enhanced diffuse field model for ad hoc microphone array calibration. *Signal Processing*, 101(0) :242 – 255, 2014.
- [81] I Borg and P.J.F. Groenen. *Modern Multidimensional Scaling : Theory and applications*. Springer, 2005.
- [82] I McCowan, M. Lincoln, and I Himawan. Microphone array shape calibration in diffuse noise fields. *Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on*, 16(3) :666–670, March 2008.
- [83] J. Capon. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*, 57(8) :1408–1418, Aug 1969.

Annexes

A Holographie impulsionnelle

A.1 Marteau d'impact automatique

La figure A.1 superpose les signaux de 50 observations successives de l'action du marteau doté d'un embout d'acier sur une table de marbre.

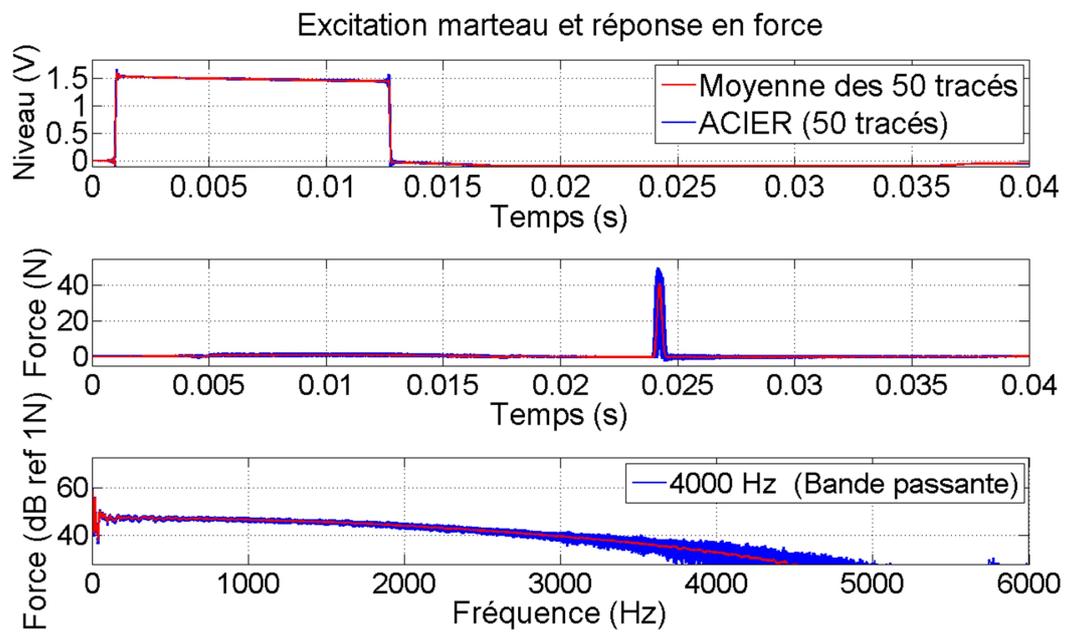


FIGURE 3.8 – Exemple de réponse du marteau contrôlé (50 observations successives) avec un embout en acier : Signal électrique de commande (haut) - Signal de Force (milieu) - Spectre de la force (bas)

A.2 Validation de la méthode

La figure 3.9 présente la coefficient de corrélation entre les ODS d'une plaque de Dural (fig. 1.1) estimées par NAH standard avec celles mesurées directement au vibromètre laser à balayage. Elle montre que les estimations NAH sont très bonnes avec plus de 80% de corrélation estimation/mesure, sur l'essentiel du spectre jusqu'à 3 kHz. Les baisses de performances interviennent dans les creux du spectre ou le rapport signal à bruit des mesures acoustique et vibratoire est plus faible.

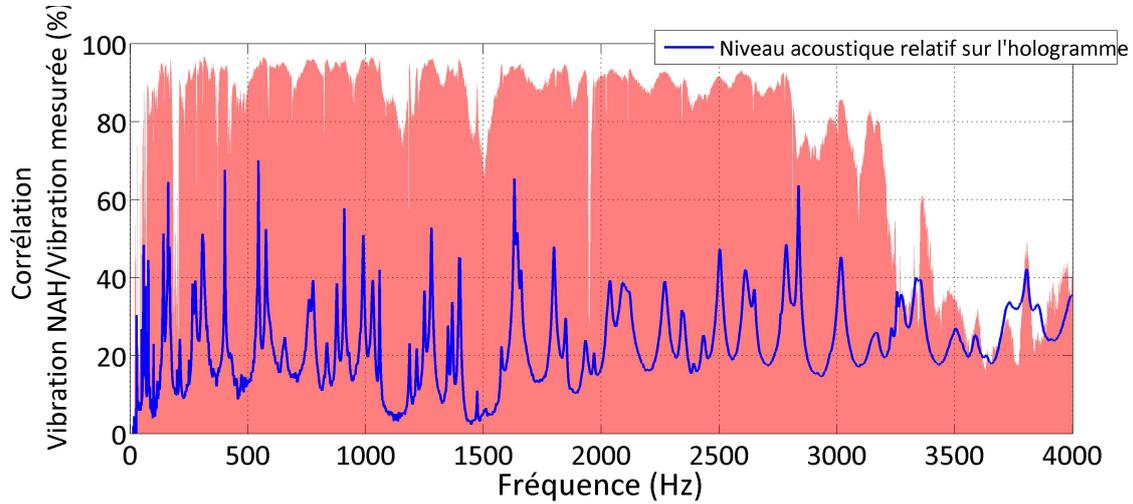


FIGURE 3.9 – Spectre moyen des champs acoustique (mesuré par l'antenne) et Coefficient de corrélation mesure vibratoire/estimation NAH standard

A.3 Clavecin Couchet

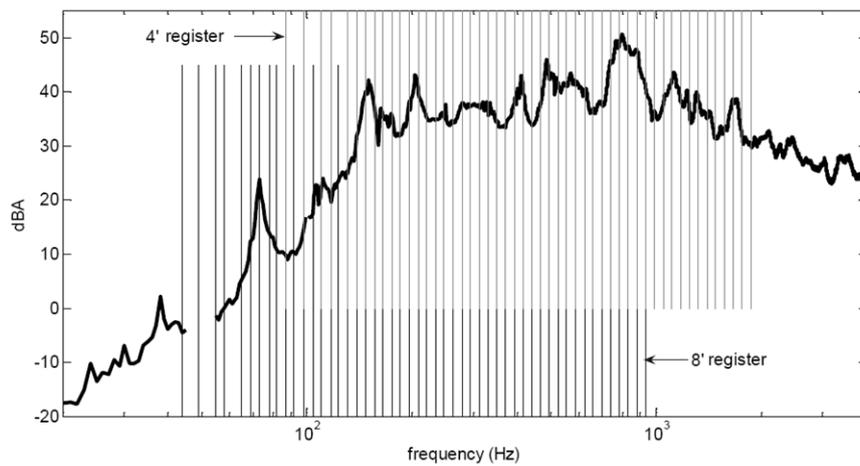


FIGURE 3.10 – Spectre acoustique moyen de la table d'harmonie du Clavecin Couchet

B Holographie compressée

La figure 3.11 présente les reconstructions d'ODS de la plaque de Dural rectangulaire par diverses méthodes et à l'aide de différentes antennes. Les diverses approximations sont comparées à la mesure réelle de la vibration par vibromètre laser. La qualité de reconstruction est évaluée par un coefficient de corrélation spatiale noté C :

$$C := \max_{i,j} \frac{|\hat{\mathbf{w}}^H \dot{\mathbf{w}}_{i,j}|}{\|\hat{\mathbf{w}}\|_2 \cdot \|\dot{\mathbf{w}}\|_2}$$

où $\dot{\mathbf{w}}_{i,j}$ est la version de $\dot{\mathbf{w}}$ décalée de i pixels selon l'axe x et de j pixels selon l'axe y . Ce recalage est dû à la non conformité des grilles de reconstruction NAH et mesures au vibromètre laser.

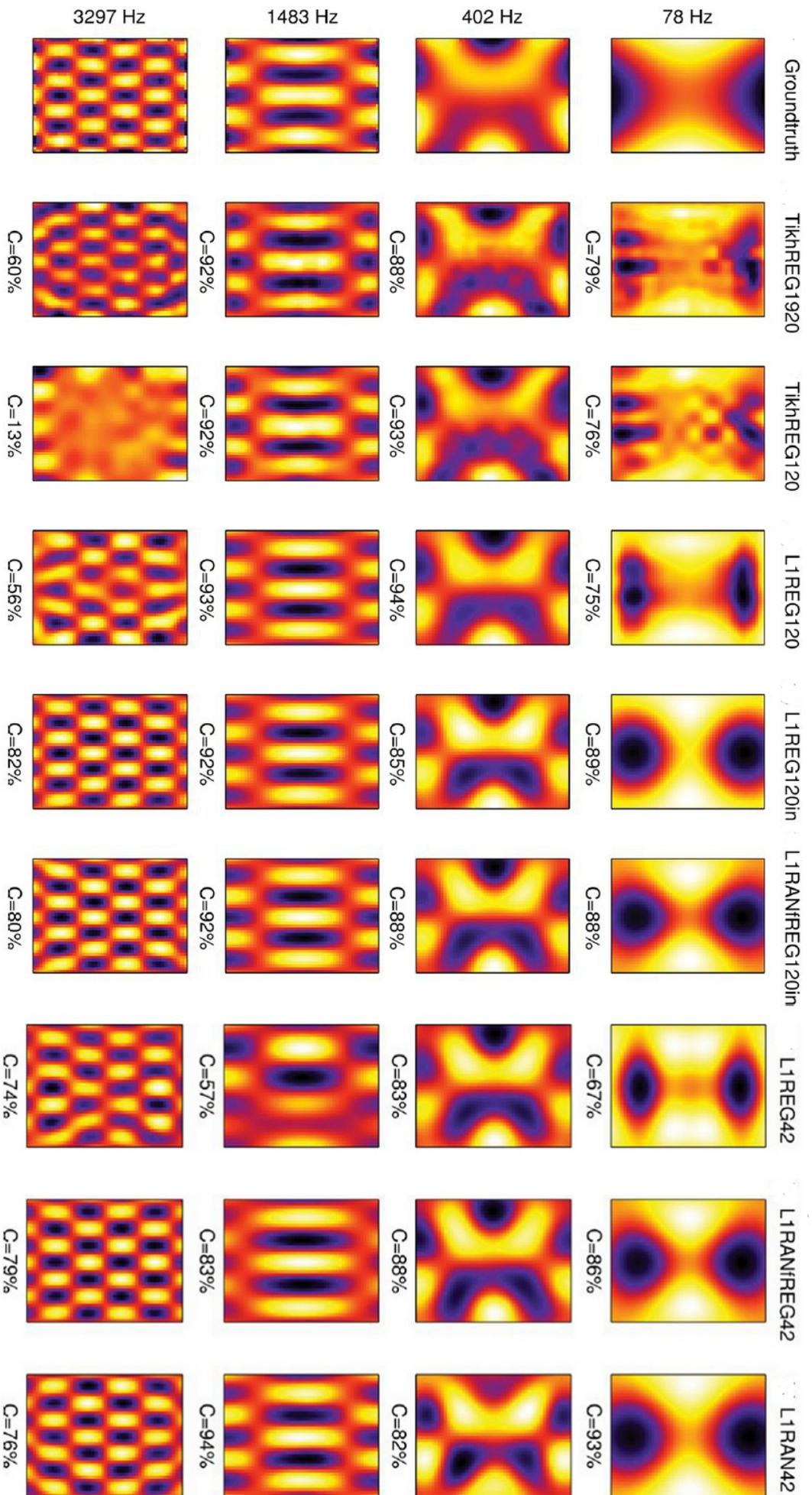


FIGURE 3.11 – Reconstructions par NAH sparse (L1) et standard (Tikh.) des ODS d'une plaque de Dural rectangulaire - Comparaison à une mesure directe au vibromètre laser (Groundtruth)

C Caractéristiques des micros MEMs

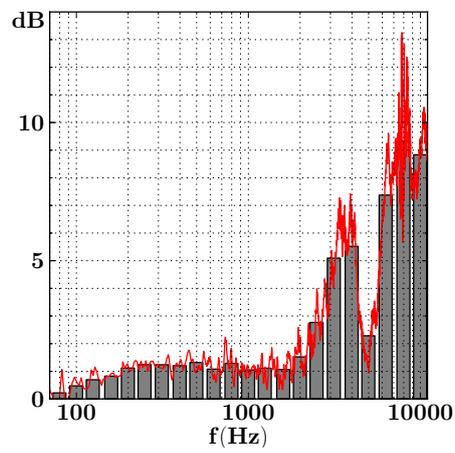
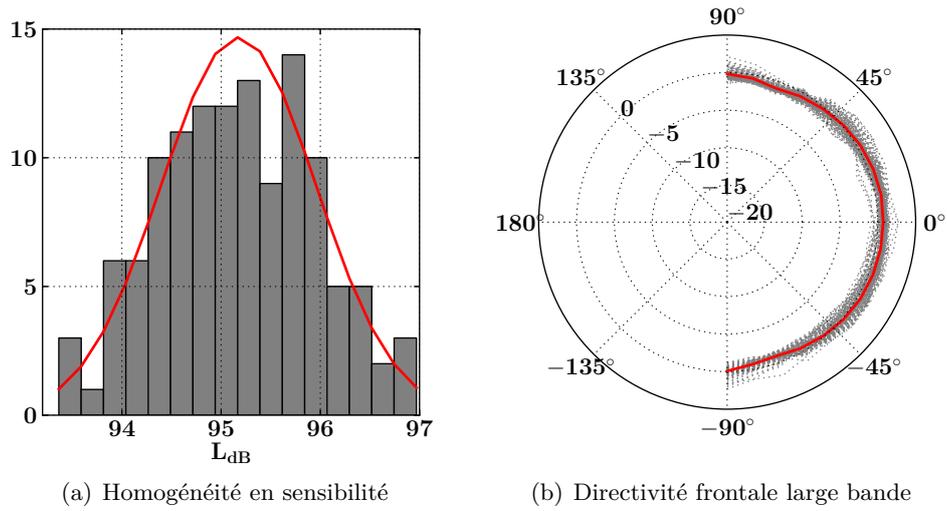


FIGURE 3.12 – Caractérisation expérimentale des microphones MEMs de la SonoCam

D Localisation de sources

D.1 Formulation des méthodes à haute résolution

Méthode Capon. La méthode du maximum de vraisemblance, ou méthode Capon [83] est basée elle aussi sur l'estimation de la matrice interspectrale \mathbf{R} .

Elle procède en deux étapes. Premièrement, on estime de nouveaux vecteurs de propagation $\tilde{\mathbf{a}}$ des points image aux microphones en s'assurant d'un gain constant à chaque point image. Le problème d'optimisation associé minimise le gain de l'antenne et s'écrit :

$$\tilde{\mathbf{a}} = \arg \min_{\tilde{\mathbf{a}}} \tilde{\mathbf{a}}^H \mathbf{R} \tilde{\mathbf{a}} \text{ tel que } \tilde{\mathbf{a}}^H \mathbf{a} = 1 \quad (3.10)$$

La solution analytique de ce problème s'écrit :

$$\tilde{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}}{\mathbf{a}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}} \quad (3.11)$$

Dans un second temps, les vecteurs propagation ainsi estimés sont assemblés dans la matrice de propagation $\hat{\mathbf{A}}$. Finalement en substituant 3.11 dans l'expression de l'estimateur 2.5 de la distribution source $\tilde{\mathbf{x}}$, on obtient l'estimateur de Capon : L'estimateur de Capon s'écrit :

$$\tilde{\mathbf{x}}_{Capon} = \frac{1}{\mathbf{A}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{A}} \quad (3.12)$$

Cet estimateur n'est efficace qu'à condition que la matrice \mathbf{R} soit bien conditionnée et que son inversion soit pertinente. Cette condition n'est réalisée qu'à faible bruit de mesure et pour des signaux stationnaires pendant la durée d'observation.

Méthode MUSIC Cette méthode introduite par Schmidt [55] est basée sur la séparation de l'espace engendré par la matrice interspectrale \mathbf{R} en un espace signal et un espace bruit. La décomposition aux valeurs propres de \mathbf{R} peut s'écrire :

$$\mathbf{R} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}^H = \mathbf{U}_s \mathbf{\Lambda}_s \mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_n \mathbf{\Lambda}_n \mathbf{U}_n^H \quad (3.13)$$

Les sous-espaces signal et bruit sont engendrés respectivement par les vecteurs propres \mathbf{U}_s correspondant aux plus grandes valeurs propres et par les vecteurs propres \mathbf{U}_n des valeurs propres restantes. Le seuil des valeurs propres délimitant les deux espaces est fixé arbitrairement.

En introduisant un modèle de la matrice d'intercorrélacion impliquant la matrice de propagation \mathbf{A} et une matrice de corrélation des signaux sources \mathbf{s} ($\mathbf{S} = \mathbf{s} \mathbf{s}^H$) et $\mathbf{R} = \mathbf{A} \mathbf{S} \mathbf{A}^H$, on montre que les propriétés d'orthogonalités permettent d'écrire l'estimateur MUSIC de la distribution source sous la forme suivante impliquant paradoxalement l'espace bruit :

$$\tilde{\mathbf{x}}_{MUSIC} = \frac{1}{\mathbf{A}^H \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{A}} \quad (3.14)$$

Il détermine la position des sources aux lieux des minima de bruit.

D.2 Localisation de source par échantillonnage compressé

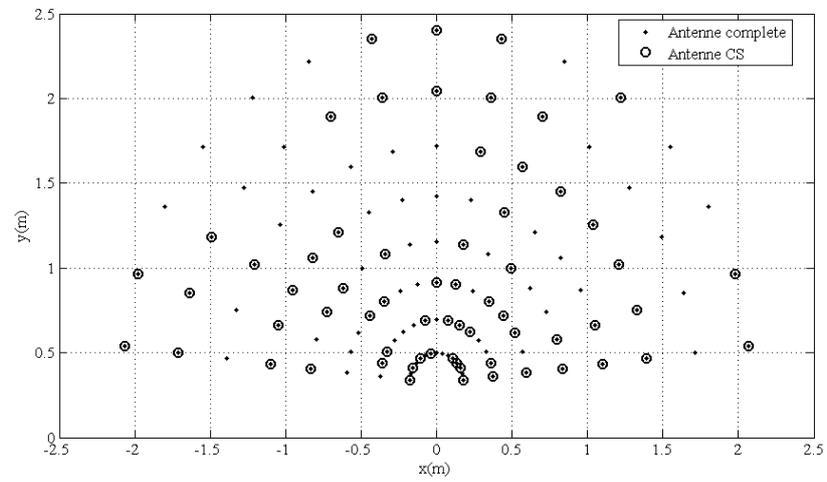


FIGURE 3.13 – Disposition des micros de l’antenne complète (120 micros) et de l’antenne CS (64 micros)

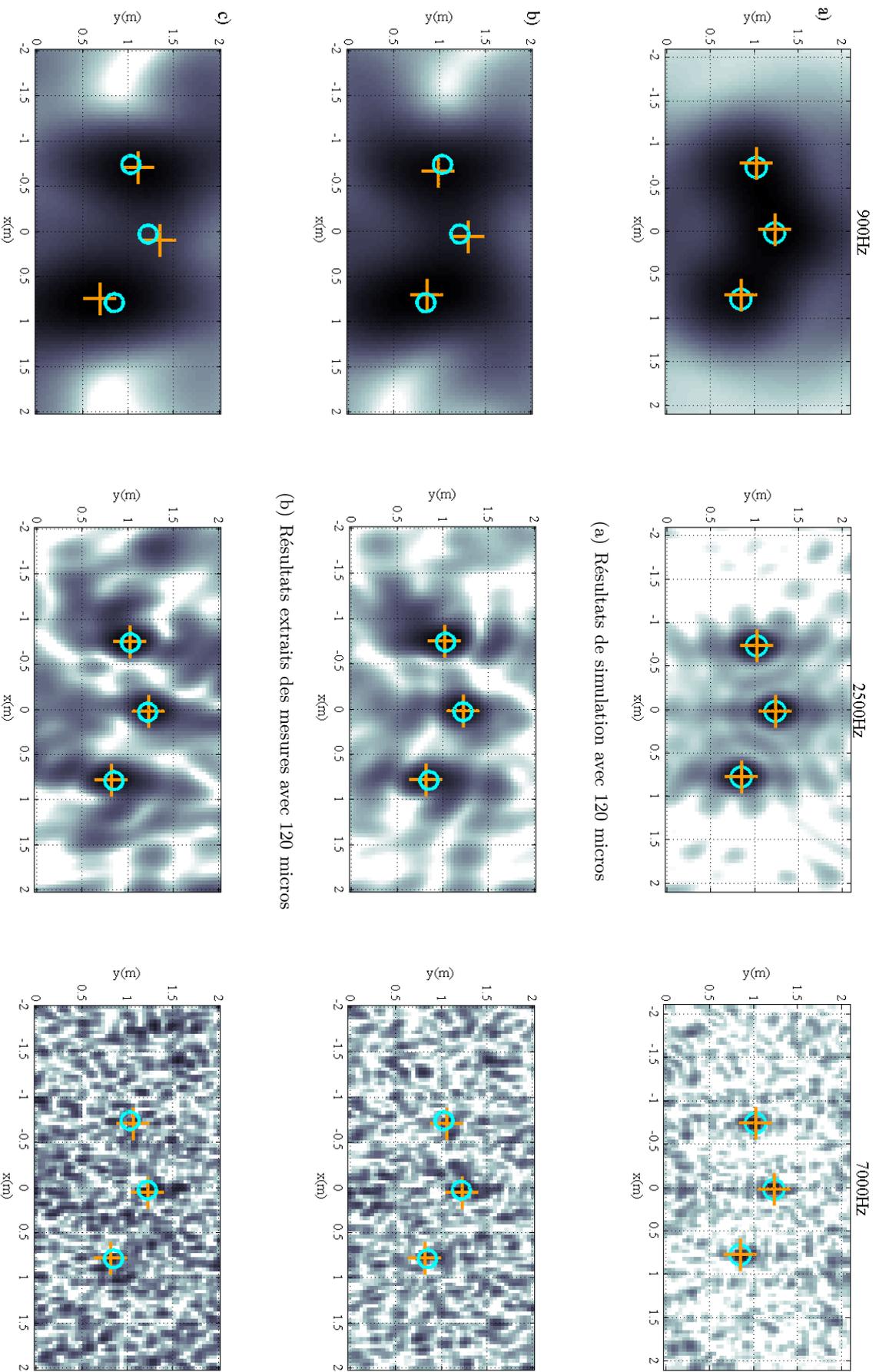


FIGURE 3.14 – Estimations OMP de 3 sources omnidirectionnelles à 900Hz, 2500Hz et 7000Hz. Croix jaune : Estimateur OMP - Cercles cyan : Sources réelles. Carte SBF en arrière plan : Dynamique 20dB

Methodes d'analyse des sources et champs acoustiques

Résumé

Ce mémoire présente les recherches en acoustique audible menées à l'Institut ∂ 'Alembert-Campus de Saint-Cyr-l'école de 2008 à 2014. Elles concernent les méthodes d'analyse expérimentale des sources et du milieu de propagation sonores. La conception et le développement de grands réseaux de microphones a permis l'émergence de méthodes originales. Premièrement l'holographie acoustique de champ proche par impulsion qui permet l'analyse modale rapide des structures vibrantes a été employée en particulier à l'étude d'instruments de musique à table d'harmonie. Parallèlement, pour étudier les sources acoustiques large bande par télédétection, nous avons travaillé à l'optimisation numérique d'antennes acoustiques. Un système pour le diagnostic des sources large bande en temps réel par la technique classique de formations de voies a été conçu. Le projet ANR-ECHANGE (2010-2013) a introduit les principes de parcimonie et d'échantillonnage compressé pour l'analyse des champs acoustiques. Ils ont été appliqués pour améliorer les méthodes inverses pour l'imagerie et la localisation des sources. A l'aide d'antennes en 3D et d'approximation parcimonieuses, nous avons aussi proposé une méthode d'identification de la directivité des sources complexes et une technique d'interpolation de fonctions de réponses impulsionnelles dans une salle. Le projet récent $M\mu$ a pour objectif de mettre en œuvre des antennes de plusieurs milliers de microphones. Des méthodes spécifiques de calibration et d'analyse des signaux sont étudiées. Dans le cadre de la chaire MOVIE, ces systèmes seront déployés à grande échelle en environnement urbain pour qualifier les sources et établir des cartographies d'indicateurs objectifs et perceptifs des nuisances sonores liés au trafic automobile.

Mots-clefs : Sources acoustiques audibles, Sources de bruit, Imagerie acoustique, Réseaux de microphones, Vibroacoustique des structures, Holographie de champ proche, Formation de voies, Approximation parcimonieuse, Échantillonnage compressé, Localisation de sources, Identification de sources, Interpolation de réponses impulsionnelles, Cartographie sonore de l'environnement, Calibration de grands réseaux.

Methods for the analysis of acoustic sources and fields

Abstract

This document reports the researches in the field of audio acoustics led at the Institut ∂ 'Alembert-Saint-Cyr-l'école Campus, between 2008 and 2014. They concern experimental methods for the analysis of acoustic sources and propagation media. The design and development of large arrays of microphones allowed the coming up of original methods for measurement and analysis of acoustic fields. First, impulse nearfield acoustical holography which provides a means for fast modal analysis of vibrating structures was used for the study, in particular, of musical instruments with soundboards. In parallel, for the remote sensing of broadband acoustic sources, we investigated the numerical optimisation of acoustic sensor arrays. This resulted in the development of a system dedicated to real-time diagnosis using classical beamforming. It gives access to the dynamical study of broadband sources, possibly non-stationary. The ANR-ECHANGE project (2010-2013), introduced sparsity principles and compressive sampling for the analysis of acoustic fields. They were implemented to improve inverse problems for source imaging and localization. Using 3D arrays and sparse approximations, we also proposed a new method for the identification of complex sources directivity and a novel technique for the interpolation of the early part of room impulse responses. The recent $M\mu$ project aims at the implementation of thousandfolds microphone arrays. Specific methods for calibration and signal processing are to be investigated. In the framework of the MOVIE program, these systems will be deployed on large scales in the urban environment in order to provide source qualifiers as well as objective and perceptive soundscape maps related to traffic.

Keywords: Audible acoustic sources, Noise sources, Acoustical imaging, Microphone arrays, Structural vibroacoustics, Nearfield Acoustical Holography, Beamforming, Sparse approximations, Compressive sampling, Source localisation, Source identification, Room impulse response interpolation, Objective soundscape, Large array calibration.